



Estimer l'erreur de prévision sur le bilan hydrique et de la biomasse aérienne produite à 12 mois dans une culture de canne à sucre

Mise en œuvre des modèles de culture Mosicas et Probe sur des données de l'île de La Réunion

Mamadou Diène DIOP

Mémoire préparé sous la direction de :

M. Philippe LETOURMY

Mme Lise BELLANGER HUSI

Organisme d'accueil :

C.I.R.A.D

Présenté le :

14 Septembre 2010

Devant le Jury :

M. Abdeljalil NACHAOUI

Mme Anne PHILIPPE

Mme Lise BELLANGER HUSI

M. Frédéric LAVANCIER

M. Philippe LETOURMY

Analyse de sensibilité de Mosicas et de Probe aux variables d'entrée qui influent de manière notable sur la quantité de biomasse aérienne produite à 12 mois.

Remerciements

De nombreuses personnes ont été impliquées de près ou de loin à l'élaboration définitive de ce mémoire et je voudrais toutes les remercier très chaleureusement.

Tout d'abord, je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon responsable de stage M. Philippe LETOURMY, pour sa gentillesse à mon égard tout au long de ce parcours, mais aussi pour sa disponibilité ainsi que pour la rigueur qu'il a su m'inculquer. Son aide m'a été très précieuse pour rédiger ce rapport, et notamment pour m'initier à la méthodologie que nécessite une telle étude.

Je souhaite également témoigner toute ma reconnaissance à l'équipe du projet C.A.S.D.A.R pour m'avoir accueilli dans l'un de leurs projets en cours, et permis ainsi de participer à un des cas d'étude intitulé : « estimer l'erreur sur le bilan hydrique et la biomasse aérienne de la canne à sucre ». Je souhaite remercier les agents du C.I.R.A.D : M. Jean Louis CHOPART, un des concepteurs du modèle de bilan hydrique Probe ; M. Jean-François MARTINÉ, concepteur du modèle de culture pour la croissance et le développement de la canne à sucre Mosicas ; M. Pablo TITTONEL, chargé du modèle de culture Field et M. Eric GOZÉ, biostatisticien.

Par ailleurs, je voudrais également remercier Mme Lise BELLANGER HUSI, enseignante en Master 2 Ingénierie Mathématique : option Probabilité et Statistique à l'Université de Nantes, pour sa gentillesse à mon égard et d'avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions. Malgré l'éloignement, elle a toujours su me conseiller et me soutenir. Ses appuis pédagogiques et scientifiques m'ont été d'un grand secours.

Je tiens à exprimer tout particulièrement ma reconnaissance à M. Richard TOMASSONE, pour sa générosité, sa disponibilité, son aide à mon égard et pour ses précieux conseils. Bien qu'il soit à la retraite, il a accepté de m'aider durant mes deux années de Master afin de compléter mes connaissances pratiques en modélisation mathématique et d'avoir une bonne méthodologie pour traiter une telle problématique de recherche. Merci pour tout M. TOMASSONE.

Je dédie ce travail à ma très chère mère Moussou CISSOKHO et à mon oncle Feu Alassane CISSOKHO qui aurait été fier et heureux de ce travail.

Table des matières

Présentation générale de la structure d'accueil.....	8
1. Le CIRAD	8
○ Sa mission	8
○ Sa stratégie	8
○ Dans le monde.....	8
2. La structure d'accueil : U. P. R « Systèmes de culture annuels »	9
A. Introduction.....	10
A.1. Problématique	10
A.2. Plan du travail	10
B. Matériels et Méthodes	12
B.1. Présentation de Mosicas et des données associées.....	12
B.1.1. Description des données associées	12
B.1.2. Description de la matière sèche issue du jeu calibration	14
B.2. Présentation de Probe et des données associées	15
B.2.1. Description des données associées	15
B.2.2. Les termes du bilan	16
B.3. Analyse de sensibilité	18
B.3.1. Définition, objectif et intérêt pratique.....	18
B.3.2. Définition des variables de sortie des modèles	19
B.4. Présentation des données de sensibilité de Mosicas	19
B.4.1. Principe de l'outil d'analyse de sensibilité de <i>Mosicas.exe</i>	19
B.4.2. Analyse de sensibilité des variables d'entrée	20
B.5. Méthodes de calcul des indices de sensibilité pour la biomasse aérienne à 12 mois.....	24
B.5.1. Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité : objectifs et intérêts pratiques	24
B.5.2. Mise en œuvre d'une approche qui ne fait aucune hypothèse sur le modèle	25
B.5.3. Mise en œuvre d'une approche pour les modèles linéaires ou non linéaires	27
B.6. Présentation des données de sensibilité de Probe	27
B.6.1. Principe de l'outil d'analyse de sensibilité de <i>Probe - w</i>	28
B.6.2. Analyse de sensibilité des variables d'entrée	28

B.7. Méthodes de calcul des indicateurs de sensibilité pour les termes du bilan hydrique.....	30
B.7.1. Définition du modèle	30
B.7.2. Méthodes de calcul et indicateur de sensibilité	31
 C. Résultats et Discussions	 33
C.1. Les indices de sensibilité des variables d'entrée de Mosicas	33
C.1.1. Exemples de paramètre « plante » relatifs à l'action de l'indice foliaire.....	33
C.1.2. Exemples de paramètre « plante » relatifs à la conversion en biomasse.....	34
C.1.3. Synthèse des résultats.....	34
 C.2. Les indicateurs de sensibilité des variables d'entrée de Probe.....	 35
C.2.1. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation de la réserve utile	36
C.2.2. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation de la cote de drainage	37
C.2.3. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation de la vitesse de croissance.....	38
C.2.4. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation du coefficient cultural.....	39
C.3. Synthèse des résultats	39
 D. Conclusion	 41
 E. Références bibliographiques et articles	 43
 F. Annexes.....	 44
F.1. Annexe 1 : Présentation de Mosicas et des données associées.....	44
F.2. Annexe 2 : Analyse de sensibilité des variables d'entrée de Mosicas.....	46
F.3. Annexe 3: Présentation de Probe et des données associées	64
F.4. Annexe 4 : Analyse de sensibilité des variables d'entrée de Probe	65
F.5. Annexe 5 : Les indices de sensibilités des variables d'entrée de Mosicas	68
F.6. Annexe 6 : Méthodes statistiques et démonstrations	70

Liste des figures

1. Figure B.1.1.a – Schéma simplifié décrivant les principaux processus dans les deux modules de croissance et de bilan hydrique
2. Figure B.1.1.b – Situation des sites expérimentaux ayant servi au calage et à la validation de Mosicas.
3. Figure F.1.1 – Les densités et les boîtes à moustaches associées à chaque distribution de la matière sèche aérienne. Le point correspond à la moyenne de la distribution.
4. Figure F.1.2 – L'évolution de la matière sèche aérienne en fonction de l'âge de culture de la canne sur l'ensemble des sites d'expérimentation
5. Figure F.2.1.a1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation du *laicroi*
6. Figure F.2.1.a2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *laicroi*
7. Figure F.2.2.b1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation du *laitb*
8. Figure F.2.2.b2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *laitb*
9. Figure F.2.3.c1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *ruemax*
10. Figure F.2.3.c2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *ruemax*
11. Figure F.2.4.d1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *ruetk*
12. Figure F.2.4.d2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *ruetk*
13. Figure F.2.5.e1 L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *sthydbio / sthydcroi*
14. Figure F.2.5.e2 L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne à 12 mois sous l'effet de la variation de *sthydbio / sthydcroi*
15. Figure F.3.1 – Courbes d'évolutions journalières du coefficient cultural et de l'évapotranspiration potentielle de la canne
16. Figure B.2.2 – Les éléments du bilan hydrique
17. Figure F.3.2 – Les densités et les boîtes à moustaches associées à chaque terme du bilan hydrique
18. Figure F.3.3 – Les courbes d'évolution des termes du bilan hydrique en fonction du nombre de jours après le début du cycle
19. Figure F.4.1 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de la réserve utile
20. Figure F.4.2 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de la cote de drainage
21. Figure F.4.3 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de la vitesse de croissance racinaire

22. Figure F.4.4 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation du coefficient cultural
23. Figure F.4.5 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de l'évapotranspiration potentielle
24. Figure C.1.1 – Les indices de sensibilité à la biomasse aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation des paramètres *laicroi* et *laitb*
25. Figure C.1.2 – Les indices de sensibilité à la biomasse aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation des paramètres *ruemax* et *ruetk*
26. Figure C.1.3.a – Comparaison des indices de sensibilité des paramètres relatifs au lai
27. Figure C.1.3.b – Comparaison des pentes de la régression sur les paramètres relatifs au lai
28. Figure C.2.1 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la réserve utile
29. Figure C.2.2 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la cote de drainage
30. Figure C.2.3 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la vitesse de croissance
31. Figure C.2.4 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet du coefficient cultural
32. Figure C.2.5 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de l'évapotranspiration potentielle

Liste des tableaux

1. Tableau B.1.1 – Caractéristiques des parcelles d’observation pour le calage et la validation de Mosicas
2. Tableau F.1 – Les productions annuelles de matières sèches aériennes sur tous les sites d’expérimentation de culture de la canne
3. Tableau B.2.2 – Description des termes du bilan et leurs unités de mesure
4. Tableau B.4.2.a1 – Exemples de paramètre « plante » relatifs à l’action de l’indice foliaire et leurs valeurs utilisées
5. Tableau B.4.2.a2 – Exemples de paramètre « plante » relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse et leurs valeurs utilisées
6. Tableau B.4.2.a3 – Exemples de paramètre « plante » relatifs au stress hydrique pour la conversion et pour la croissance et leurs valeurs utilisées
7. Tableau B.6.2.a1 – Les valeurs des paramètres du réservoir sol pour l’analyse de sensibilité
8. Tableau B.6.2.a2 – Les valeurs du paramètre racine pour l’analyse de sensibilité
9. Tableau B.6.2.b – Les valeurs des données d’entrée pour l’analyse de sensibilité
10. Tableau F.5.1 – Les paramètres plantes relatifs à l’action de l’indice foliaire
11. Tableau F.5.2 – La sensibilité du modèle suite aux variations des paramètres relatifs à l’action de l’indice foliaire sur la biomasse aérienne
12. Tableau F.5.3 – Les paramètres plantes relatifs à la conversion en biomasse
13. Tableau F.5.4 – La sensibilité du modèle suite aux variations des paramètres relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse aérienne

Présentation générale de la structure d'accueil

1. Le CIRAD

Le CIRAD est le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Il œuvre dans le but de mettre en place un important dispositif de recherche pour la communauté scientifique nationale et internationale. En plus, il mène des activités de coopération avec beaucoup de pays du Sud afin d'apporter son expertise d'aide à la décision aux professionnels du secteur de l'agriculture. Ainsi, à partir des besoins du développement agricole, il établit ses programmes d'activité et contribue par la même occasion aux enjeux internationaux de l'agronomie.

○ Sa mission

En partenariat avec les pays du Sud, il produit et transmet de nouvelles connaissances pour accompagner le développement agricole et contribuer au débat sur les grands enjeux mondiaux de l'agronomie.

○ Sa stratégie

Elle dépend des mutations économiques, sociales et environnementales engendrées par le phénomène de la mondialisation. Cependant, le CIRAD concentre principalement ses activités autour de six axes scientifiques prioritaires afin de conforter son dispositif de coopération internationale dans le monde. Ces axes prioritaires sont :

- L'intensification écologique : contribuer à inventer une agriculture respectueuse de l'environnement et capable de nourrir la planète.
- La biomasse énergie et les sociétés du Sud : étudier les conditions d'émergence et les modalités de mise en valeur des bioénergies dans les pays du Sud.
- L'alimentation sûre et diversifiée : innover pour une alimentation accessible, diversifiée et sûre.
- La santé animale et les maladies émergentes : pour anticiper et gérer les risques sanitaires infectieux liés aux animaux sauvages et domestiques.
- Les politiques publiques, la pauvreté et les inégalités : afin d'accompagner les politiques publiques pour la réduction des inégalités structurelles et de la pauvreté.
- L'agriculture, l'environnement, la nature et les sociétés : pour mieux comprendre les relations entre l'agriculture et l'environnement et entre les sociétés humaines et la nature, pour gérer durablement les espaces ruraux.

○ Dans le monde

A partir de ses directions régionales, le CIRAD mène des activités de coopération avec plus de 90 pays. Il développe par ailleurs des pôles scientifiques à vocation régionale dans l'outre-mer français.

En France métropolitaine, il met à la disposition de la communauté scientifique nationale et internationale, un dispositif important de recherche et de formation¹.

2. La structure d'accueil : U.P.R « Systèmes de culture annuels »

Cette Unité Propre de Recherche (U.P.R), du département *Persyst* (Performance des Systèmes de cultures annuelles), a pour principale ambition de concevoir des systèmes de production performants, durables pour les cultures annuelles, tant du point de vue économique, que du point de vue social et environnemental.

Les atouts majeurs de cette unité sont, tout d'abord, une expertise reconnue, mais également des équipes pluridisciplinaires ainsi que des domaines de compétences très diversifiées : analyse des interactions entre génotype et environnement, bioénergie, entomologie, agronomie, biostatistique, technologies appliquées aux systèmes de grandes cultures tropicales...

¹ Cette présentation est extraite de <http://www.cirad.fr/qui-sommes-nous>

A. Introduction

La production de la biomasse est avant tout le résultat de la photosynthèse qui permet à la plante, grâce à la fixation du gaz carbonique et de l'énergie lumineuse, de fabriquer sa matière sèche végétale. Cette fixation nécessite toutefois un transfert d'eau et l'assimilation d'éléments minéraux, substances qu'elle puise dans le sol. Ce dernier intervient alors dans le processus de la production végétale à travers ses fonctions de stockage et de transfert d'eau et des éléments minéraux dissous. Son influence sur la production reste néanmoins subordonnée à celle du climat, puisque celui-ci détermine les besoins de la plante en fixant le niveau de l'activité photosynthétique.

Ainsi, pour analyser les relations entre le sol et la plante, il est important de considérer l'eau et les éléments minéraux qui entrent directement dans la composition des tissus végétaux, et à ce titre, représentent des facteurs de croissance. Il faut également tenir compte des conditions de la croissance, c'est-à-dire, de l'état structural du sol, qui intervient sur l'alimentation hydrique et minérale à travers ses effets sur la croissance et le fonctionnement des racines.

Dans le cadre de cette étude, on dispose d'un ensemble de données expérimentales et de données météorologiques pour la culture de la canne à sucre issues de l'île de La Réunion. Une partie de ces données est le résultat de simulations faites à partir du modèle de bilan hydrique (**Probe**) et du modèle de croissance de la canne à sucre (**Mosicas**). Ils permettent de simuler des états du couvert² (la hauteur, la biomasse, le rendement, le sucre...) de la canne à sucre à pas de temps journalier³. En effet, à partir des variables d'entrée fournis par l'utilisateur, ils calculent respectivement l'évolution de ces états du couvert et les termes du bilan hydrique à savoir : la quantité réelle d'eau évaporée par le système sol-plante ou évapotranspiration réelle, les excès d'eau (drainage et ruissellement), les taux de satisfaction en eau, en éléments minéraux, en rayonnement journalière de la culture et différents autres paramètres qui en découlent.

En tenant compte de ces deux modèles de culture, nous allons pouvoir dire avec quelles précisions on modélise la biomasse aérienne produite à 12 mois par la canne à sucre et les termes de son bilan hydrique. En outre, on identifiera les paramètres et les données d'entrée qui influent de manière notable sur cette biomasse aérienne produite.

A.1. Problématique

On souhaite estimer l'espérance et la variance de l'erreur des termes du bilan hydrique et de la production de biomasse aérienne à 12 mois dans une culture de canne à sucre.

Pour ce faire, on va estimer respectivement la variance de l'erreur de prévision de ces modèles de culture lorsqu'on considère indépendamment les facteurs limitant la croissance et le développement de la canne.

A.2. Plan de travail

L'étude de la variabilité de la biomasse produite à 12 mois en fonction des facteurs de croissance passe par une analyse de la sensibilité globale des variables d'entrée des modèles Mosicas et Probe

² L'ensemble des variables d'états de la végétation de la canne à sucre

³ On peut également choisir d'autres fréquences de sortie des résultats (décade, mois)

de la canne ayant une influence directe sur la biomasse aérienne produite et sur les termes de son bilan hydrique. En effet, cette analyse de sensibilité sur ces entrées sera effectuée en étudiant l'effet de leurs variations sur les sorties de ces modèles. Autrement, on analyse les conséquences que génèrent ces modèles lorsque leurs entrées subissent une perturbation. Ainsi, on identifiera les paramètres ou données d'entrée susceptibles de jouer de manière notable sur la production annuelle de matière sèche aérienne.

Ces paramètres sont connus de manière imprécise. Alors, on choisira une plage de variation et un pas d'itération par rapport à leurs valeurs standards pour étudier leurs impacts sur les sorties des modèles Mosicas et Probe.

La sensibilité du modèle Mosicas aux paramètres d'états sera évaluée sur les sept sites d'expérimentation ayant servi au calage et à la validation du modèle. Les résultats obtenus seront d'abord représentés sous forme graphique afin de voir leurs évolutions et d'avoir une idée sur la nature de la relation existante entre la matière sèche aérienne et la variation du paramètre considéré. Ensuite, à l'aide des techniques statistiques de calcul des indices de sensibilité⁴, on déterminera quantitativement l'effet de la variation de ces paramètres sur la biomasse aérienne annuelle.

Pour la sensibilité du modèle Probe aux paramètres, les résultats graphiques des valeurs simulées seront comparés avec les valeurs de référence pour chaque pas d'itération du paramètre considéré⁵ dans sa fourchette de variation. Et, on utilisera l'erreur quadratique moyenne entre les données simulées et les données observées sur les essais afin de calculer les indicateurs de sensibilité déterminant quantitativement l'effet de la variabilité des termes du bilan hydrique.

Cependant, puisque les données météorologiques sont renseignées avec une certaine imprécision, on étudiera aussi la sensibilité de ces modèles à ces données d'entrée climatiques.

⁴ Principalement définis dans le livre de Andrea Saltelli intitulé « Sensitivity Analysis »

⁵ Des paramètres plantes et sol sont déjà proposés par le logiciel pour une étude de sensibilité.

B. Matériels et Méthodes

Les données étudiées ici sont issues des simulations obtenues grâce aux logiciels de modélisation dynamique du bilan hydrique dans le sol cultivé (**Probe – w**) et de la croissance de la canne à sucre (**Mosicas.exe**). *Probe – w* est basé sur le modèle Probe et *Mosicas.exe* est une plateforme de simulation basée sur le modèle Mosicas.

Avec Mosicas, on s'intéresse particulièrement à la matière sèche aérienne (**msa**) produite à 12 mois, tandis qu'avec Probe on s'intéresse aux termes du bilan hydrique. L'étude de ces données aura pour but d'optimiser la quantité de production de cette biomasse aérienne produite à 12 mois et les termes de son bilan hydrique.

B.1. Présentation de Mosicas et des données associées

Mosicas.exe simule des états du couvert, des états hydriques et des indicateurs bioclimatiques (les besoins en eau, le rayonnement intercepté par l'indice foliaire...) de la canne lorsque les données climatiques (pluviométrie, température et rayonnement), les paramètres du sol, des itinéraires techniques (irrigations et drainages) et une option de simulation ont été renseignés au départ.

B.1.1. Description des données associées

Le modèle global est composé de deux modules dynamiques à pas de temps journalier : un bilan hydrique et un module de croissance. Leurs liaisons et principaux processus sont schématisés dans la **Figure B.1.1.a** ci-dessous.

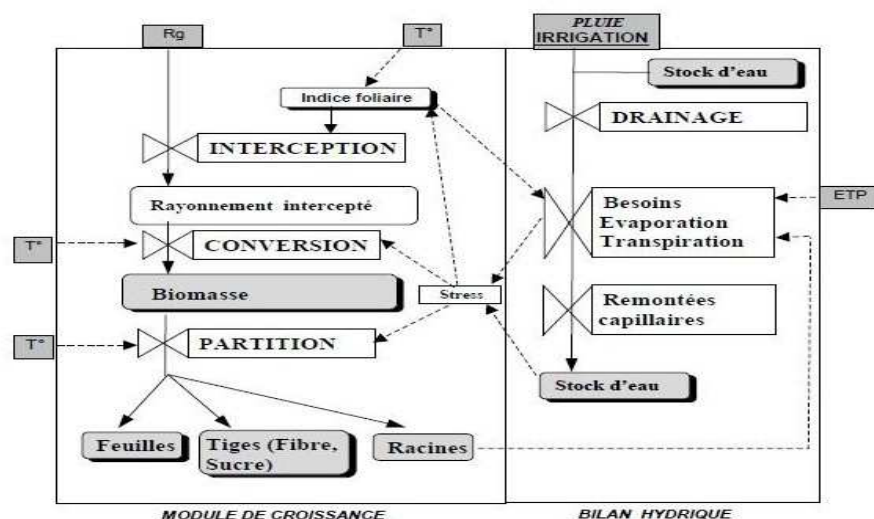


Figure B.1.1.a – Schéma simplifié décrivant les principaux processus dans les deux modules de croissance et de bilan hydrique

Le bilan hydrique est celui inclus dans le modèle *CERES* Et le module de croissance est organisé selon trois processus de fonctionnement totalement dépendants. Il s'agit de l'interception du

rayonnement utile par l'indice foliaire afin de calculer le rayonnement utile intercepté ; la conversion de ce dernier en biomasse et la partition de cette biomasse en ces différentes composantes : les racines, les feuilles, la tige et le sucre. Cependant, on s'intéresse qu'à l'estimation de la biomasse aérienne produite à 12 mois en réalisant une analyse de sensibilité de Mosicas par rapport aux variables d'entrée.

Les sept parcelles d'expérimentation (ou essais) aux états structuraux différents ayant servi au calage et à la validation de Mosicas sont décrites dans le **Tableau B.1.1** ci-dessous.

Tableau B.1.1 – Caractéristiques des parcelles d'observation pour le calage et la validation de Mosicas

<i>Code</i>	<i>Site</i>	<i>Alti</i>	<i>Période</i>	<i>Trait</i>	<i>Rmoy_j</i>	<i>Tmoy_j</i>	<i>Plucum</i>
COP2_96	<i>Colimaçons</i>	800	08/94 – 10/95	<i>P</i>	13.1	18.6	577
CO457099	<i>Colimaçons</i>	800	08/98 – 09/99	<i>PI</i>	13.1	18.3	899
BXT15_99	<i>Barau</i>	550	10/98 – 10/99	<i>P</i>	17.4	20.5	2797
TI99	<i>Tirano</i>	150	11/98 – 10/99	<i>I</i>	19.7	21.7	593
TIIRR98	<i>Tirano</i>	150	04/97 – 03/98	<i>I</i>	18.2	22.1	497
TISTR98	<i>Tirano</i>	150	04/97 – 03/98	<i>PI</i>	18.2	22.4	497
LPSE1_95	<i>Ligne Paradis</i>	100	08/94 – 10/95	<i>I</i>	19.3	23	910

- *Alti* : altitude en mètres
- *Trait* régime hydrique : *P* Pluvial ; *PI* Pluie et Irrigué ; *I* irrigué
- *Rmoy_j* : rayonnement journalier moyen (MJm^{-2}) durant la période d'étude
- *Tmoy_j* : température moyenne journalière (°C) durant la période d'étude
- *Plucum* : pluie cumulée (mm) durant la période d'étude

Elles sont localisées à : Barau, Colimaçon, Ligne Paradis et Tirano de l'Île De La Réunion et sont constituées de la variété R570⁶ de canne dont l'écartement entre les lignes est de 1,5 m partout.⁷

⁶ R comme La Réunion et 570 est le numéro de sortie de la canne

⁷ Jean François MARTINE – thèse de doctorat : *Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle*, CIRAD

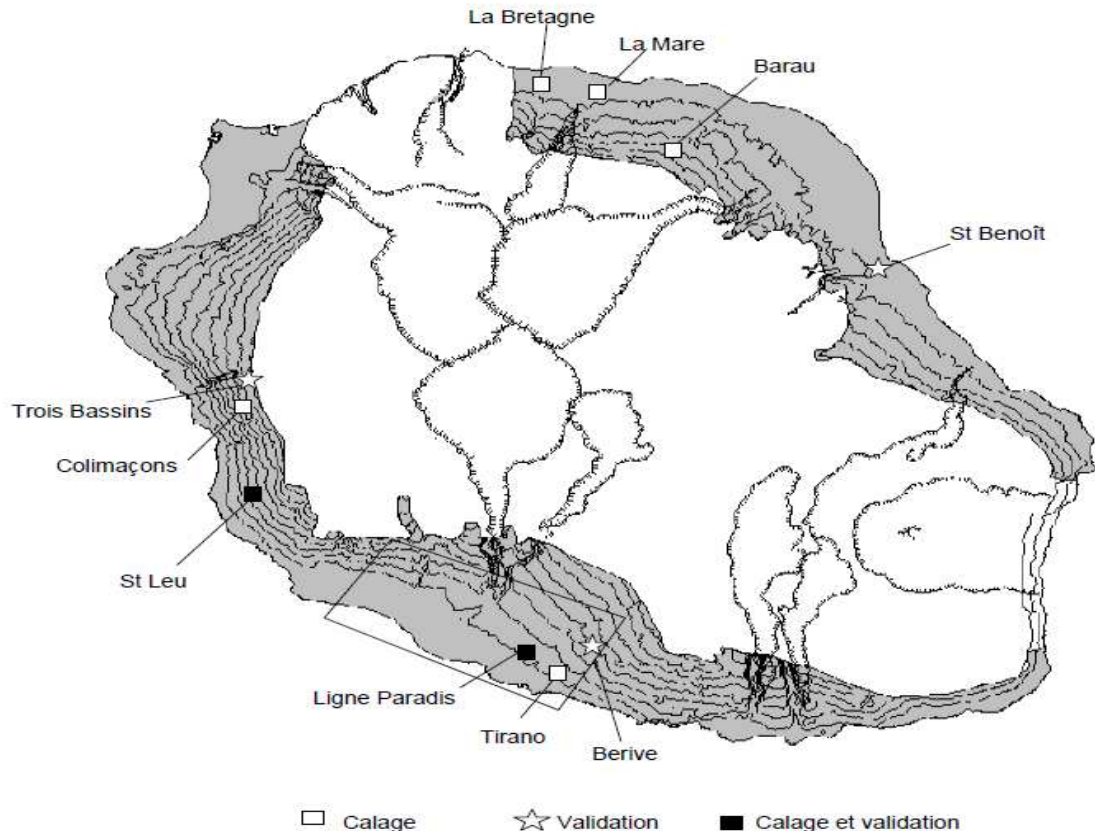


Figure B.1.1.b – Situation des sites expérimentaux ayant servi au calage et à la validation de Mosicas. Le cadre représente la zone d’application du modèle

B.1.2. Description de la matière sèche issue du jeu de calibration

Le calage de Mosicas consiste à ajuster les données d’entrée et les paramètres plantes pour obtenir des estimations qui concordent avec certaines variables d’état de la végétation de la canne provenant de sources externes considérées plus fiables. Dans la suite, les données simulées à l’aide de *Mosicas.exe* nous permettront d’étudier les quantités annuelles de biomasse aérienne produites en fonction de la variation des entrées du modèle. C’est la simulation appelée « sensibilité » de *Mosicas.exe*.

Dans l’analyse exploratoire, on fera une analyse graphique de la distribution de biomasse aérienne produite par la canne sur les différents essais.

Les graphiques de la **Figure F.1.1 (Annexe 1. Page 44)** représentent la densité et la boîte à moustache associée à la *msa* recueillie sur chacun des sept sites d’expérimentation. Ces distributions ne correspondent pas à des distributions Normales. D’ailleurs, le test de Normalité de Shapiro et Wilk rejette l’hypothèse de Normalité (α = risque de 1^{ère} espèce fixé à 5%). Ces distributions présentent de plus soit une queue plus lourde sur la partie droite, soit une bimodalité. Cette dernière situation s’explique par le fait qu’il existe deux valeurs de *msa* qui sont les plus représentées dans la végétation de la canne. Son stade végétatif est alors stable sur une partie de la période de culture. En

effet, pour un climat donné, la consommation en eau de cette variété de canne dépend principalement de son âge. Ainsi, cette période correspond à la formation, au niveau du sol, d'un plateau de pousses (tiges) issu directement de bouture (plantation). On dit que la plante est en phase de reconstruction. D'ailleurs, la **Figure F.1.2 (Annexe 1, Page 45)** permet d'observer cette très faible valeur voire nulle de la *msa* durant les 90 premiers jours du cycle. En abscisse, sont reportées les différentes dates d'observation de cette culture. Le trait vertical (en pointillé) sur les courbes représente le 12^{ème} mois de la culture.

La *msa* produite croît à partir du deuxième mois jusqu'à la fin du cycle de culture sur l'ensemble des sites. La croissance et le développement de cette plante entraîne alors une augmentation de la quantité de cette biomasse aérienne. Cependant, la quantité atteinte en fin de cycle diffère selon les sites. En effet, sur les sites Colimaçons, les quantités obtenues sont deux fois moins importantes que celles obtenues sur les sites : Barau, Ligne Paradis et Tirano. Ceci est certainement dû à leurs différentes localisations géographiques. En effet, les sites colimaçons ont une altitude très élevée (800 m) par rapport aux autres. Par conséquent, plus la plante est située à haute altitude, plus la quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par la plante dans l'atmosphère est importante. De plus, à cette altitude, l'effet du rayonnement solaire sur ces parcelles entraîne une autre perte d'eau par ruissellement dans le sol. De ce fait, la réserve hydrique dans le sol sera beaucoup moins consommée par la plante. D'ailleurs, à titre illustratif on représente dans le **Tableau F.1 (Annexe 1, Page 45)** les quantités obtenues en **tonnes/m²** de matières sèches aériennes à la coupe.

Le modèle Mosicas étant couplé à un module de bilan hydrique, ce dernier participe vraisemblablement au calcul de biomasse aérienne journalière. Cependant, afin d'étudier l'impact de ce type de module sur la quantité de biomasse produite à 12 mois, on choisit de mettre en pratique un modèle spécifique à la modélisation du bilan hydrique de la canne à sucre dans le sol : c'est le modèle Probe (ou **PRO**gramme de **B**ilan de l'**E**au).

B.2. Présentation de Probe et données associées

Probe-w calcule le bilan hydrique journalier de la canne à sucre dans le sol cultivé après avoir fourni en entrée les données météo, les paramètres sur le réservoir sol et les besoins de la plante.

B.2.1. Description des données associées

Les données sont issues des expérimentations de canne à Sole E en 2008 en culture vierge. Elles sont les résultats d'une simulation dite « normale » (sans variation de variable d'entrée). Parmi celles-ci, nous avons : la pluviométrie (**Pluie + Irrig Asp** et/ou **Irrig GAG**), les indicateurs bioclimatiques pour la plante : l'évapotranspiration potentielle (**ETP**). C'est une demande en eau potentielle utilisée par le sol pour l'évaporation et par la plante pour la transpiration⁸. Il y a aussi les besoins en eau de la culture ou le coefficient cultural (**Kc**). C'est le taux de satisfaction des besoins en eau, en élément minéral, en rayonnement et en température pour le bon déroulement du processus de production

⁸ Les définitions de ces mots clés sont tirées du site http://www.canne-progres.com/irrigation/avant_propos.php

de matière sèche végétale. Il caractérise ainsi la croissance de la plante au cours de son cycle végétatif. Ces derniers sont les données d'entrées du modèle Probe.⁹

Quant aux paramètres d'entrée, ils sont relatifs au système sol-plante : la réserve utile en eau (***RU***), la cote de drainage par centimètre dans le sol (***CD***) et de la vitesse de croissance racinaire de la plante par jour (***Cj***).

Le modèle Probe a pour objectif premier : la modélisation du bilan hydrique. Pour ce faire, il utilise tout d'abord ces données d'entrée. A titre illustratif, on visualise les courbes d'évolution de l'*ETP* et du *Kc* dans les graphes de la **Figure F.4.1. (Annexe 4. Page 63)**.

Pour un cycle de culture de la canne, on distingue quatre phases successives (initiale, croissance, maturité et sénescence) et trois valeurs limites de coefficients culturaux : Kc_{ini} , Kc_{mid} et Kc_{end} .

Le *Kc* est de 0.2 en début de cycle et évolue quotidiennement pour atteindre la valeur maximale de 1,2. Cependant, il varie différemment selon l'altitude et l'âge de la culture.

L' *ETP* varie au cours du cycle dans le même sens que le *Kc* selon les conditions climatiques. En effet, elle dépend de la température, de l'ensoleillement, du vent ou de l'humidité de l'air mais aussi de l'état de la croissance de la canne.

En plus des données d'entrée, les paramètres du réservoir sol, de la plante et de ses racines que prennent Probe sont : la *RU*, la *CD*, l'état initial des réserves hydriques, la profondeur initiale du front racinaire (*FR*) et la *Cj*. Ils sont définis dans le guide d'utilisation du logiciel Probe-w¹⁰ par J. L. CHOPART comme suit :

- *RU* : c'est la réserve maximale en eau utile en mm d'eau par unité (cm) de profondeur de sol.
- *CD* : C'est la profondeur (en cm) à partir de laquelle on considère que l'eau n'est plus ou ne sera plus utilisable par la plante même lorsque le système racinaire aura atteint sa côte maximale. C'est donc à cette profondeur que commence le drainage.
- Front d'humectation initial : La profondeur (en cm), à la date de début de calcul, de la limite entre l'horizon humide de surface et un horizon plus profond pouvant être suffisamment asséché pour empêcher la croissance des racines.
- Front racinaire initiale (*FR*): La profondeur de sol exploré par les racines (en cm), à la date de début de calcul.
- Stock d'eau total initial : Le stock d'eau utile entre la surface et le front d'humectation (en mm) à la date de début de calcul.
- Stock d'eau racinaire initial : Le stock d'eau utile entre la surface et le front racinaire (en mm) à la date de début de calcul.

Les quatre derniers paramètres représentent l'état initial des réserves hydriques.

⁹ Toute cette partie correspond à la configuration des données climatiques et irrigation pour Probe-w.

¹⁰ J.L. CHOPART – Probe-w (PROgramme de Bilan de l'Eau) : logiciel de modélisation du bilan hydrique dans un sol cultivé. Présentation et guide d'utilisation, CIRAD

B.2.2. Les termes du bilan hydrique

Il s'agit des variables simulées après avoir paramétré les entrées du modèle définis ci-dessus.

Le bilan hydrique

On estime chaque jour l'évolution du niveau de remplissage de la *RU* du sol. Ainsi, il synthétise des informations sur la réserve maximale en eau utile dans le sol prospectable par les racines, le climat, les besoins en eau de la culture, le système racinaire et les irrigations. D'ailleurs, on représente tout ce processus dans la **Figure B.2.2**, ci-dessous.

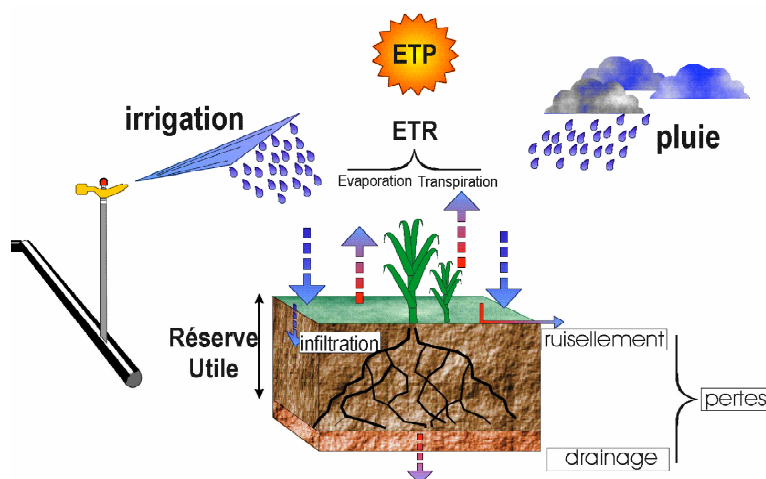


Figure B.2.2 – Les éléments du bilan hydrique

Les termes du bilan hydrique

Ils sont obtenus par une simulation dite normale de Probe-w¹¹. Mais on ne s'intéressera qu'aux termes dits opérationnels du bilan, c'est-à-dire ceux qui seront utilisés dans l'étude de la sensibilité de Probe aux variables d'entrées. Ils sont définis dans le **Tableau B.2.2** ci-dessous.

Tableau B.2.2 – Description des termes du bilan et leurs unités de mesure

<i>terme</i>	<i>descriptif</i>	<i>unité</i>
<i>Dr</i>	la quantité d'eau en excès dans le sol cultivé	mm
<i>ETR</i>	évapotranspiration réelle	mm
<i>ETMc</i>	évapotranspiration maximale ajustée	mm
<i>ETR/ETMc</i>	Taux de satisfaction des besoins en eau de la culture	

¹¹ La simulation dite de sensibilité est aussi possible avec Probe-w

La fréquence de sortie de ces valeurs calculées est en jour¹² : c'est le numéro de jour après le début du calcul du cycle (*JaDC*).

La **Figure F.3.2 (Annexe 3. Page 63)** présente la densité et la boîte à moustaches de chaque distribution des variables représentant un terme du bilan hydrique. Elles présentent des valeurs extrêmes et ne suivent pas une distribution Normale. Comme dans le cas de la biomasse aérienne, les distributions sont soit allongées vers un des côtés (*Dr* et *ETR/ETMc*), soit possèdent une double bosse (*ETR* et *ETMc*). En effet, le premier cas signifie qu'il existe un moment du cycle où le drainage et le taux de satisfaction des besoins en eau n'évoluent pas. La plante a atteint alors une quantité potentielle de réserve hydrique dans le sol pour son bon fonctionnement. La bimodalité s'explique par le fait qu'il existe deux valeurs de ces évapotranspirations qui sont les plus représentées. Ces dernières correspondent à deux situations totalement différentes durant le cycle de culture. En effet, la demande en eau du climat est soit faible, soit elle est à son niveau maximal.

La **Figure F.3.3 (Annexe 3. Page 64)** représente les courbes d'évolution correspondantes à ces termes en fonction du nombre de jours après le début du cycle.

La courbe d'évolution du *Dr* présente deux groupes de variation à hauteur différente. En effet, la quantité d'eau constatée est importante ou non selon les déficits hydriques de la plante. Durant les 50 premiers jours, la canne est en phase de reconstruction. Ses racines ne sont pas suffisamment développées pour extraire dans le sol la quantité d'eau potentielle nécessaire à son développement. De ce fait, un apport d'eau par irrigation pour combler ce déficit entraînera par la même occasion un taux de satisfaction hydrique satisfaisant. De plus, la nouvelle croissance de la variation du drainage observée entre 200 et 300 jours signifie que la canne redevient déficitaire en eau. Elle a donc atteint un stade végétatif de son développement où elle n'a plus la capacité de faire face à son autosuffisance hydrique. Cette période est appelée le sevrage.

Ce même phénomène est observé sur l'*ETR/ETMc* : il est très fort en début de cycle et en fin de cycle et peut être très faiblement satisfait en eau en milieu de cycle. L'*ETR* et l'*ETMc* ont le même sens de variation. La demande en eau du climat est plus importante en milieu de cycle qu'aux extrémités.

B.3. Analyse de sensibilité

B.3.1. Définition, objectif et intérêt pratique

L'analyse de sensibilité est une technique statistique qui s'intéresse à la variabilité de la sortie d'un modèle. En effet, elle étudie comment la variabilité des entrées se répercute sur celle de la sortie en déterminant quelle part de variance de cette sortie est due à telle entrée ou tel ensemble d'entrées.

Son objectif est de répondre à la question suivante : « **Quelles sont les principales sources d'incertitude parmi les variables d'entrée d'un modèle ?** »¹³

¹² Des sorties en décade, moi, année ou cycle sont aussi possibles.

¹³ David MAKOWSKI – *Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité : objectifs et principales étapes*, INRA

Par rapport à notre étude, son intérêt pratique est d'identifier les variables d'entrée qui ont une forte influence sur la quantité de *msa* produite à 12 mois et sur les termes du bilan hydrique.

B.3.2. Définition de variables de sortie des modèles

Le cours de l'évolution de la *msa* observée après la plantation de la canne n'est pas identique à celui des termes du bilan hydrique. Par conséquent, les méthodes statistiques à utiliser dépendront de la nature de la relation identifiée entre les variables d'entrée et la *msa* d'une part ; les variables d'entrée et les termes du bilan hydrique d'autre part. Mais au préalable, nous rappelons les variables de sortie des modèles *Probe* et *Mosicas* sur lesquelles porte l'étude de sensibilité des paramètres et des données d'entrées.

On les définit de la manière suivante :

Soit $X^i = (X_1^i, \dots, X_p^i)$ une variable i d'entrée où p est le nombre de valeurs de la même variable X^i telle que : les X_k^i pour $k = 1, \dots, p$ représentent les valeurs prises par la variable considérée dans son domaine d'incertitude. Ainsi, on définit $Y(X^i)$ comme étant les sorties des modèles. En effet, on aura respectivement pour les sorties associées à *Mosicas* et à *Probe*, un unique vecteur correspondant aux différentes valeurs de cette *msa* et une matrice dont chaque vecteur correspond aussi aux différentes valeurs d'un terme particulier du bilan hydrique.

B.4. Présentation des données de sensibilité pour *Mosicas*

Les données de sensibilité diffèrent de ceux du calage dans la mesure où elles sont les résultats de simulation de la *msa* sous l'effet de la variation de chaque paramètre plante. On fait varier tous les paramètres « plante » du modèle dans des domaines de variation qui leurs sont spécifiques afin d'étudier la variabilité de cette biomasse aérienne. Pour ce faire, on utilise une technique d'analyse de sensibilité pour chaque paramètre considéré.

B.4.1. Principe de l'outil d'analyse de sensibilité de *Mosicas.exe*

On procède de la manière suivante :

- Soit p le nombre de valeurs différentes prises par le paramètre (variable X) considéré dans son domaine de variabilité. Ainsi, pour chaque valeur de ce paramètre on a une simulation de la *msa* produite à 12 mois sur l'ensemble du cycle de culture.

On définit par la suite les distributions (les p valeurs) x_1, \dots, x_p en fixant respectivement la valeur standard du paramètre, son pourcentage de variation et le nombre d'itération effectuées dans son domaine de variabilité.

La valeur standard correspond à la valeur du paramètre plante obtenue en repousse. C'est-à-dire juste après la première coupe de la canne. Pour définir le pourcentage de variation du paramètre et le nombre d'itérations dans chaque situation, on signale que la variabilité de ces paramètres est peu connue. Alors, on choisit un domaine de variation sur lequel on fixe un écart en pourcentage entre chaque valeur de paramètre. Enfin, le nombre d'itérations est

le nombre d'écarts en pourcentage que l'on effectuera de part et d'autre de la valeur standard du paramètre.

- On calcule les biomasses aériennes à partir de ces p valeurs grâce à l'outil de simulation **Mosicas.exe** pour ne prendre que ceux qu'on a obtenu à 12 mois.
- On détermine la relation $Y = f(X)$ (ou $msa12 = f(\text{variation du paramètre})$) qui en découle pour chaque valeur du paramètre plante prise dans son domaine de variabilité. On a donc $\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_p$.
- On calcule un indice de sensibilité à partir de cette relation. En effet, la relation obtenue est déterminante car l'hypothèse faite sur le modèle peut être un indice pour le choix de la technique de calcul des indices de sensibilité à utiliser.

Ainsi, si le modèle est linéaire, on utilisera l'indice **src** (*Standard Regression Coefficient*) équivalent, au carré près, au coefficient de d'ajustement du modèle. Au cas où la linéarité n'est pas vérifiée mais que le modèle est monotone, on utilisera l'indice **srrc** (*Standard Rank Regression Coefficient*). Il est équivalent à l'indice **src** mais les calculs se font à partir des rangs des observations. D'une manière générale, il existe d'autres méthodes qui ne font aucune hypothèse sur le modèle et qui sont basées sur une décomposition de la variance totale de la variable de sortie. Il s'agit des fonctions **sobol**, **fast** ou **morris** qui sont tous définies dans la librairie **sensitivity** sous **R**. Ces dernières ont toute pour domaine de définition l'intervalle $[0, 1]^p$. Alors on n'a pas pu les adapter à nos données car les paramètres que l'on a utilisés n'avaient pas tous une valeur initiale comprise dans cet intervalle. De ce fait, l'utilisation de la méthode **src** aurait été la plus adéquate si le modèle que l'on obtient après avoir régressé les quantités de *msa* à 12 mois sur les différentes valeurs prises par le paramètre considéré est linéaire. De plus, on pourrait se ramener à un modèle linéaire dans le cas contraire ou bien utiliser la méthode **srrc**. Cependant, les méthodes basées sur la technique de la décomposition de variance sont identiques à celle d'**ANOVA** connue sous le nom de l'analyse de la variance. C'est une alternative au calcul d'indice de sensibilité dans la mesure où les conditions d'utilisation sont vérifiées¹⁴.

D'ailleurs, on se servira de cette technique pour déterminer les indices de sensibilité des variables d'entrée afin de les classer par ordre d'importance.

B.4.2. Analyse de sensibilité des variables d'entrée

Il existe beaucoup de paramètres « plante » relatifs au module de bilan hydrique et au module de croissance de Mosicas. Mais, dans cette étude, nous nous sommes intéressés à quelques uns de ces paramètres considérés comme notables par les spécialistes de la culture de la canne à sucre. Il s'agit :

- de ceux liés à l'action de l'indice foliaire au moment de la réception du rayonnement solaire par les limbes des feuilles,
- de ceux intervenant au moment de la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse

¹⁴ Inspiré du livre d'Andrea SALTELLI : *Sensitivity Analysis* ; Julien JACQUES thèse de doctorat : *Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée* et d'une publication de David MAKOWSKI intitulée : *Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité*

- et de ceux liés à la tolérance au stress hydrique pour la conversion de la biomasse et pour la croissance de l'indice foliaire.

Cependant, on signale que les relations entre les valeurs de ces paramètres sont peu connues¹⁵ et que *Mosicas.exe* propose une analyse de sensibilité que sur les paramètres et non sur les données d'entrée. Il nous restera alors à étudier l'impact des erreurs de ces dernières.

a. L'étude de sensibilité des paramètres plantes

On étudie l'effet de leurs variations sur la *msa* à 12 mois située en aval de leur lieu d'action. Ainsi, par paramètre, un pas de variation, un nombre d'itération et une fourchette de variation sont employés et les résultats sont présentés que sous forme graphique afin de mettre en exergue l'effet de ces perturbations.

Exemples de paramètre « plante » relatifs à l'action de l'indice foliaire

L'indice foliaire (***lai***) est un coefficient exprimant le potentiel de fixation d'énergie par la plante. Il est donc fonction de la température, de la source carbone et peut-être du stress hydrique et de la surface massique des feuilles¹⁶. Les paramètres à étudier sont : la vitesse de croissance du ***lai*** (***laicroi***) ; la température seuil d'élongation de croissance du ***lai*** (***laitb***) ou encore la valeur en dessous de laquelle il n'y a pas de croissance du ***lai***.

Dans le **Tableau B.4.2.a1** ci-dessous, on présente les codes de ces paramètres ainsi que les valeurs utilisées pour l'étude de sensibilité. En effet, on les définit respectivement comme dans l'outil de sensibilité proposé par Mosicas de la manière suivante :

- *cod_param* : le nom du paramètre que l'on veut tester
- *unité* : son unité expérimentale
- *val_std* : sa valeur standard pour la sensibilité
- *variation* : l'écart défini entre chaque valeur de paramètre
- *nbre_itération* : le nombre d'écarts effectué de part et d'autre de la valeur standard
- *plage_variation* : son domaine de variabilité

Tableau B.4.2.a1 – Exemple de paramètres « plante » relatifs à l'action de l'indice foliaire

<i>cod_param</i>	<i>unité</i>	<i>val_std</i>	<i>variation</i> (%)	<i>nbre_itération</i>	<i>plage_variation</i>
<i>laicroi</i>	/°C	0.035	9	4	0.022 – 0.048
<i>laitb</i>	/°C	12	9	4	7.68 – 16.32

Le principe est le même sur les autres paramètres dont on veut étudier la sensibilité.

Dans la **Figure F.2.1.a1 (Annexe 2. Page 47)**, on constate sur l'ensemble des sites une légère variabilité de la biomasse aérienne tout au long du cycle de culture annuel. Ainsi, sur la **Figure**

¹⁵ Un projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) intitulé « *Delicas* » est encore sur ce sujet. ANR est une agence française de financement de projets de recherche.

¹⁶ Voir <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-autre/foliaire/52779>

F.2.1.a2 (Annexe 2. Page 52), on visualise cette variabilité au 12^{ème} mois afin de mettre en exergue l'effet de la variation de la vitesse de croissance de l'indice foliaire sur la *msa*.

Le trait vertical (en pointillé) représente la valeur standard du paramètre *laicroi* et correspond sur la courbe à la valeur de référence de la *msa*. Et l'axe des abscisses correspond au domaine de variation du paramètre considéré.

Il est assez fréquent que les phénomènes biologiques soient linéaires dans des domaines voisins, mais un changement de conditions extérieures peut entraîner une cassure. Ainsi dans cette figure, l'évolution des quantités de *msa* produite à 12 mois en fonction de la variation de la vitesse de croissance de l'indice foliaire indiquent clairement une cassure. En effet, sur tous les sites d'expérimentation sauf pour *BXT15_99* et *TI99*, l'incertitude du *laicroi* produit une tendance antagoniste. Effet, la *msa* produite chute à partir de la première valeur du *laicroi* sur *BXT15_99*. Par contre, sur le reste, elle augmente pour se stabiliser au-delà de la valeur nominale du paramètre.

Une faible vitesse de croissance de l'indice foliaire se traduit par une baisse de production annuelle de *msa*. Alors, on devrait s'attendre à ce que cette quantité croît quand le paramètre *laicroi* augmente. Ce qui n'est pas le cas. La plante semble atteindre une intensité optimale de *lai* à partir de laquelle la production de biomasse aérienne devient suffisante. Donc, l'effet de ce paramètre n'est sensible que si cette intensité n'est pas atteinte.

Dans la **Figure F.2.2.b2 (Annexe 2. Page 52)**, on constate globalement deux tendances différentes sur les sites : une baisse progressive de la quantité de biomasse produite à 12 mois en fonction du paramètre *laitb* à Barau et à Colimaçons et une variation de cette même quantité à Ligne Paradis et à Tirano en fonction de ce même paramètre. Il y a alors une nette dépendance de cette production et du type d'essai. La *msa* est alors sensible à la variation du paramètre *laitb*.

Quand ce paramètre varie, la quantité de *msa* obtenue sur Barau et Colimaçons diminue progressivement. On sait qu'en dessous de cette valeur qu'il n'y a pas de croissance du *lai*. Dans ce cas, c'est la valeur optimale de sa vitesse qui agit sur la production de biomasse aérienne. Dans le cas contraire, on a vraisemblablement une croissance de cette vitesse. Cependant, ceci n'a pas explicitement une influence sur la *msa* à 12 mois car, ce dernier est stable quand le *laicroi* augmente. Ces trois sites ont la particularité d'être situés à haute altitude (800m pour Colimaçons et 550 pour Barau) et si la température seuil d'élongation augmente, on doit s'attendre à une forte quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par la plante dans l'atmosphère. Une autre quantité d'eau subit un ruissellement dans le sol. Ce qui se traduit naturellement par une baisse de *msa*.

Sur Tirano et Ligne Paradis, cette *msa* varie quand le paramètre *laitb* est perturbé. Mais, la variation est beaucoup plus forte sur les parcelles situées à Ligne Paradis que sur ceux de Tirano. Ce phénomène est dû aux facteurs combinés de sa basse altitude (100m) et d'une forte quantité de pluie cumulée (910 mm) durant la période d'étude par conséquent dépendante de la nature de la parcelle considérée. On voit donc que les changements de situations observées sont causés par la perturbation de la valeur optimale du paramètre *laitb*. Il est donc sensible à la *msa* produite.

Exemple de paramètre « plante » relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse

Il s'agit de la *ruemax* et de la *ruetk* qui signifient respectivement : le coefficient maximum de conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse et l'effet de la température sur cette conversion.

Tableau B.4.2.a2 – Exemple de paramètre « plante » relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse

<i>cod_param</i>	<i>unité</i>	<i>val_std</i>	<i>variation (%)</i>	<i>nbre_iteration</i>	<i>plage_variation</i>
<i>ruemax</i>	<i>g/MJ</i>	3,22	9	4	2.06 – 4.38
<i>ruetk</i>	<i>s.u</i>	0,00037	9	4	0.00024 – 0.00050

Dans la **Figure F.2.3.c1 (Annexe 2. Page 52)**, la variation de *ruemax* entraîne visiblement une grande variabilité de *msa*. D'ailleurs, la **Figure F.2.3.c2 (Annexe 2. Page 52)** montre un coefficient de conversion en biomasse perturbateur car, plus *ruemax* est surestimé, plus la *msa* augmente. Mais, l'amplitude de la production est plus ou moins importante selon le site d'expérimentation considéré.

Cependant, on obtient le phénomène contraire quand le paramètre *ruetk* augmente (voir **Figure F.2.4.d2, Annexe 2. Page 52**). Il n'augmente, plus la production annuelle ne diminue. D'ailleurs, une forte température entraîne un fort taux d'évapotranspiration potentielle du système plante-sol dans le climat, occasionnant par la suite une déshydratation de la canne. D'où, l'apparition d'une baisse de production de la biomasse aérienne.

Exemple de paramètre « plante » relatifs au stress hydrique pour la conversion et pour la croissance

Il s'agit des tolérances au stress hydrique pour la croissance de l'indice foliaire et pour la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse : *sthydcroi* et *sthydbio*.

Tableau B.4.2.a3 – Exemple de paramètre « plante » relatifs au stress hydrique pour la conversion et pour la croissance

<i>cod_param</i>	<i>unité</i>	<i>val_std</i>	<i>variation (%)</i>	<i>nbre_iteration</i>	<i>plage_variation</i>
<i>sthydcroi</i>	<i>s.u</i>	1	9	4	0.64 – 1.36
<i>sthydbio</i>	<i>s.u</i>	1	9	4	0.64 – 1.36

Dans la **Figure F.2.5.e1 (Annexe 2. Page 52)**, la variabilité de la *msa* est très faible sur les parcelles *BXT15_99* et *CO457099* et nulle sur le l'ensemble des sites particulièrement au 365^e jour de culture de la canne. D'ailleurs, la **Figure F.2.5.e2 (Annexe 2. Page 52)** mets en évidence ces évolutions en fonction de la variation de la tolérance au stress hydrique pour la conversion du rayonnement utile en biomasse et de celle pour la croissance de l'indice foliaire. L'affectation d'un coefficient de stress

hydrique est un signe de déficit en eau de la plante. Donc, plus ce coefficient est fort, plus la canne à sucre est déficitaire en eau pour produire la biomasse aérienne.

Cependant, la quantité de *msa* produite est identique sur les sites Tirano, Ligne Paradis et sur la parcelle *COP2_96* de Colimaçons quelque soit les taux de tolérance au stress hydrique. La sensibilité est alors nulle avec les deux paramètres. Cependant, la *msa* évolue inversement sur *BXT15_99* et *CO457099*. En effet, on constate une cassure de la courbe dès la 2^e valeur du paramètre. Elle est en baisse sur *BXT15_99* et en hausse sur *CO457099*. Le type d'environnement a donc influencé la production annuelle de *msa*.

b. L'étude de sensibilité des données d'entrée

L'originalité de cette étude est que ces données ne sont pas prises en compte par le module d'analyse de sensibilité de *Mosicas.exe*. Dans ce cas, un jeu de données climatiques enregistré sur plusieurs autres années différentes de celui du calage permettra d'étudier leurs sensibilités. En effet, le fait de prendre de nouvelles années constitue un domaine de variation que l'on choisit pour étudier la variabilité de la biomasse aérienne produite à 12 mois. Ainsi, l'indice de sensibilité le plus fort déterminera la période de culture la plus importante afin d'obtenir une production annuelle de *msa* satisfaisante.

B.5. Méthodes de calcul des indices de sensibilités de la biomasse aérienne à 12 mois

B.5.1. Analyse d'incertitude et Analyse de sensibilité : objectifs et intérêts pratiques

Les sources d'incertitude dans un modèle défini comme suit : $y = f(x, \theta)$ peuvent être liées soit à la forme de l'équation f , soit aux variables d'entrée x et soit aux paramètres θ . Dans notre cas, l'équation correspond à un ajustement des quantités prédites de biomasse aérienne à 12 mois sur la variation du paramètre considéré. Les données d'entrée sont : les données climatiques (ou la pluviométrie), les caractéristiques du sol des sites. Les paramètres plantes sont ceux liés au module de bilan hydrique et de croissance de *Mosicas*. D'ailleurs, c'est sur ces derniers que sera basée l'étude de sensibilité sous *Mosicas* car *Mosicas.exe* ne propose pas un outil d'analyse de sensibilité sur les données d'entrée. Par conséquent, Le modèle devient :

$$y = f(\theta) = f(\theta_1, \dots, \theta_p).$$

où p est le nombre de valeurs prises par le paramètre considéré.

L'étude de sensibilité se fera séparément sur les sept parcelles d'essais afin de mesurer l'impact de leurs états structuraux sur la production annuelle de *msa* ou de voir si l'erreur de prédiction varie selon les types d'environnement.

a. Analyse d'incertitude

L'analyse d'incertitude permet de déterminer le niveau d'incertitude dans $f(\theta)$ qui résulte de l'incertitude dans θ . Elle donne ainsi des informations sur l'incertitude associée aux prédictions du modèle. Pour cela, on calcule la moyenne et la variance estimées des distributions de msa suivant chaque site d'expérimentation afin de mesurer quantitativement la variabilité de ces distributions. Ces deux statistiques classiques ont été utilisées par Saltelli¹⁷ :

$$\hat{E}(Y) = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p y_j \text{ et } \hat{V}(Y) = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p [y_j - \hat{E}(Y)]^2$$

Cette analyse met en évidence à titre indicatif d'éventuels types d'incertitude qui peuvent être : soit le manque de connaissance sur la température optimale pour le développement de la canne ; soit l'erreur de mesure de la densité des plantes sur chaque parcelle d'expérimentation¹⁸.

b. Analyse de sensibilité

On rappelle que l'analyse de sensibilité quant à elle permet de déterminer les principales sources d'incertitude parmi les n paramètres $\theta_1, \dots, \theta_n$. Ainsi, on pourra identifier ceux qui ont une forte influence sur la msa à 12 mois. Quant à la sensibilité des données d'entrée, il nous faut considérer d'autres années de culture différentes de celles ayant servi au calage et à la validation de Mosicas. Ce qui mettra en exergue les données météo ou les déterminants pédoclimatiques sous lesquelles les quantités de biomasses aériennes produites à 12 mois sont meilleures. Avec ces nouvelles situations on déterminera ensuite les indices de sensibilité correspondants afin de les hiérarchiser par ordre d'importance.

Avec cette analyse, on peut espérer apprécier l'importance d'un paramètre θ sur la variance de la variable cible y . Pour cela, nous étudions la variance conditionnelle de y sachant $\theta = x$:

$$V(y/\theta = x)$$

Ainsi, on saura la part de variance expliquée par le paramètre considéré. Donc, la technique de calcul d'indice de sensibilité que nous utiliserons sera basée sur une décomposition de la variance totale¹⁹.

Les modèles que l'on obtient avec les valeurs simulées ne sont généralement pas linéaires et leurs formes analytiques sont difficilement explicites. Cependant, on mettra alors en œuvre deux approches différentes d'analyse de sensibilité : la première ne fait pas d'hypothèse sur le modèle obtenue et la seconde suppose que ce modèle est soit linéaire ou soit non linéaire.

B.5.2. Mise en œuvre d'une approche qui ne fait aucune hypothèse sur le modèle

Le théorème de la variance totale :

¹⁷ Andrea SALTELLI – *Sensitivity Analysis* – page 23,

¹⁸ David MAKOWSKI - *Analyse d'incertitude et analyse de sensibilité : Objectifs et principales étapes*, INRA

¹⁹ Julien JACQUES (<http://math.univ-lille1.fr/~jacques/>), thèse : *Contribution à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée*.

Soit un couple (θ, Y) de variables aléatoires, où Y prend ses valeurs dans R et chaque θ dans un ensemble fini ou dénombrable, ou dans R ou R^p . Si la variance est finie alors :

$$V(Y) = V(E(Y | \theta)) + E(V(Y|\theta))$$

Où

$$E(Y|\theta) = \int y p_{y|\theta}(y) dy$$

$$V[E(Y|\theta)] = \int [E(Y|\theta) - E(Y)]^2 p_{\theta}(\theta) d\theta$$

$$V[Y|\theta] = \int [y - E(Y|\theta)]^2 p_{y|\theta}(y) dy$$

$$E(V[Y|\theta]) = \iint [y - E(Y|\theta)]^2 p_{y|\theta}(y) dy p_{\theta}(\theta) d\theta$$

Un indicateur de sensibilité de Y à θ sera la variance de l'espérance de Y conditionnellement à θ :

$$V(E(Y | \theta))$$

Par conséquent, plus la quantité sera grande plus le paramètre sera important, D'ailleurs, un indicateur normalisé est défini pour exprimer la sensibilité de Y à θ par :

$$S_{\theta} = \frac{V(E(Y | \theta))}{V(Y)} = \frac{V_{\theta}}{V}$$

Cet indice quantifie la part de variance de Y due à θ . Cette décomposition est analogue à celle réalisée en analyse de variance connue sous le nom d'**ANOVA** où on met en évidence la variance expliquée par l'ajustement au modèle sur la variance totale.

B.5.3. Mise en œuvre d'une approche pour les modèles linéaires ou non linéaires

On suppose que l'ajustement des valeurs simulées Y sous l'effet de la variation de la valeur standard du paramètre θ suit un modèle linéaire.

$$y_j = b_0 + b_1 \theta + \varepsilon_j \text{ pour tout } j = 1, \dots, p$$

Où

- j parcourt le domaine de variation de la valeur standard de θ .
- b_1 est le paramètre du modèle lié à la valeur en cours de θ ou la pente de la régression
- b_0 est le terme constant de la régression ou la quantité de msa initialement obtenue au début du cycle.
- ε_j est l'erreur d'ajustement (les résidus) que l'on commet. On suppose qu'elle suit une loi Normale centrée en 0 et de variance σ^2 : $N(0, \sigma^2)$

²⁰ Andrea Saltelli: *Sensitivity Analysis* – page 28. On l'appelle aussi, l'indice de sensibilité de premier ordre par Sobol ou la mesure de l'importance.

- y_j est la valeur simulée ou la *msa* produite à 12 mois en fonction de θ .

La significativité de b_1 dans la régression est un indice permettant d'étudier l'importance des paramètres sur la sortie y_j .

En effet, en réécrivant le modèle de régression comme suit :

$$\frac{y - \bar{y}}{\hat{s}_y} = \sum_j \frac{\hat{b}_1 \hat{s}_\theta}{\hat{s}_y} \frac{\theta_j - \bar{\theta}}{\hat{s}_\theta}$$

où

$$\bar{y} = \sum_j \frac{y_j}{p} ; \bar{\theta} = \sum_j \frac{\theta_j}{p} ; \hat{s}_y = \left[\sum_j \frac{(y_j - \bar{y})^2}{p-1} \right]^{1/2} ; \hat{s}_\theta = \left[\sum_j \frac{(\theta_j - \bar{\theta})^2}{p-1} \right]^{1/2}$$

on obtient le coefficient $\hat{b}_1 * \frac{\hat{s}_\theta}{\hat{s}_y}$ (**Annexe 6. Page 71**). Il est connu sous le nom de **SRC** et est basé sur le calcul d'un rapport entre la variance expliquée par le modèle et la variance totale.

Remarque :

En élevant le coefficient de corrélation linéaire au carré on aboutit, au carré près, au coefficient *standardized regression coefficients* (**Annexe 6. Page 71**). En effet, on a :

$$\rho_{\{\theta, y\}} = \frac{cov(\theta, y)}{\sqrt{v(\theta)v(y)}}$$

$$\rho_{\{\theta, y\}}^2 = \frac{\hat{b}_1 \hat{s}_\theta}{\hat{s}} = SRC_\theta$$

Donc, l'importance de cet indice comme mesure de sensibilité dépend de la bonne qualité d'ajustement du modèle.

Les techniques définies ci-dessus : le coefficient d'ajustement et la pente de la régression ont servi à déterminer quantitativement les parts de variance de la sortie d'un modèle due à ces entrées et à identifier par la même occasion les plus importantes à la production de la *msa* annuelle.

La pente de régression (comme indicateur de sensibilité) a été calculée, non sur les données brutes centrées $(\theta_j - \bar{\theta})$, mais sur les données d'écarts relatifs à la valeur de référence $\frac{\theta_j - \bar{\theta}}{\bar{\theta}}$.

B.6. Présentation des données de sensibilité de Probe

Elles sont les résultats d'une simulation appelée «analyse de sensibilité» de Probe-w²¹ des termes du bilan sous l'effet de la variation de chaque variable d'entrée dans son domaine d'incertitude.

²¹ C'est l'étape analyse de sensibilité après avoir paramétré le modèle en données et de paramètres d'entrée

On souhaite identifier les variables qui ont une forte influence sur les termes du bilan²² hydrique de la canne à sucre lorsque leurs valeurs initiales sont perturbées. Pour ce faire, nous avons utilisé l'erreur quadratique moyenne comme indicateur de sensibilité entre les données simulées et les données observées.

B.6.1. Principe de l'outil d'analyse de sensibilité de *Probe* – *w*

On procède de la manière suivante :

- Soit p le nombre de valeurs différentes prises par le paramètre considéré dans son domaine de variabilité. Alors, pour chaque valeur de ce paramètre on a une simulation des termes du bilan hydrique.

On définira ces valeurs comme une distribution x_1, \dots, x_p en fixant au préalable la valeur initiale du paramètre (un scalaire), son pourcentage de variation et les valeurs extrêmes de son domaine de variabilité dans l'outil d'analyse de sensibilité.

La valeur initiale correspond à la valeur du paramètre plante obtenue en culture vierge de la canne en l'occurrence au moment de la plantation en condition pluviale ou en irrigation par aspersion. Pour définir le pourcentage de variation de la valeur initiale de la variable considérée et ses valeurs limites (en pourcentage), on signale comme dans Mosicas que sa variabilité. Alors, on choisit un domaine de variation en pourcentage dans lequel varie la variable considérée. Ensuite, on fixe un écart en pourcentage (ou le pourcentage de variation) entre chaque valeur de paramètre. C'est aussi la variation en pourcentage des valeurs initiales en plus ou en moins de la même variable. Cependant, pour chaque donnée d'entrée, on a une courbe d'évolution qui représente sa valeur initiale contrairement aux paramètres du réservoir sol et de la plante où l'on a des scalaires. Alors, on associera un certain bruit à leurs valeurs initiales afin d'étudier leurs impacts sur la variabilité des termes du bilan.

- On simule des termes du bilan correspondant à chaque valeur de la variable considérée grâce à l'option simulation de l'outil d'analyse.
- On détermine la relation $Y = f(X)$ (ou $BILAN = f(AGE)$) qui en découle pour chaque valeur de la variable d'entrée prise dans son domaine de variabilité.
- On définit et on calcule l'indicateur de sensibilité correspondante afin d'étudier les écarts liés à la variation de chaque variable d'entrée.

B.6.2. Analyse de sensibilité des variables d'entrée

L'analyse de sensibilité permet de voir l'incidence d'une imprécision dans la définition d'une entrée sur l'erreur et l'imprécision des variables de sortie²³. Les paramètres et données d'entrée, dont nous allons étudier la sensibilité, sont ceux qui ont servi aux simulations des différents termes du bilan hydrique de la canne. Comme dans le cas précédent, Les résultats obtenus sont présentés sous forme graphique afin de visualiser l'effet de l'imprécision de chacune des entrées.

a. Etude de sensibilité des paramètres du système sol-plante

²² Ils sont expliqués précédemment (page 17)

²³ J.L CHOPART – *Probe-w, logiciel de modélisation du bilan hydrique dans un sol cultivé : présentation et guide d'utilisation*

Avec Probe-w, cela correspond à la phase de paramétrage du réservoir sol, de la plante et de ses racines permettant ainsi de configurer les entités²⁴ sur lesquelles sera réalisé le bilan hydrique. En effet, il s'agit de définir le paramètre à tester, le pas et sa gamme de variation pour analyser les incertitudes des termes du bilan.

Les paramètres du réservoir sol

Dans le **Tableau B.6.2.a1** ci-dessous, on définit respectivement leurs valeurs initiales obtenues à la culture en vierge, un écart en pourcentage en plus ou en moins de chaque valeur du paramètre (pas de variation) et les valeurs limites en pourcentage (mini / maxi en %) du domaine de variation correspondant (gamme de variation). Ces valeurs sont définies dans tous les tableaux qu'on a utilisés pour une analyse de sensibilité.

Tableau B.6.2.a1 – Les valeurs des paramètres du réservoir sol pour les analyses de sensibilité

<i>paramètre</i>	<i>valeur initiale</i>	<i>unité</i>	<i>variation (%)</i>	<i>mini/maxi (%)</i>
<i>RU</i>	1	<i>mm/cm</i>	2	-10 / 10
<i>CD</i>	100	<i>cm</i>	2	-10 / 10

Dans les figures **Figure F.4.1** et **Figure F.4.2 (Annexe 4. Page 64)**, les courbes d'évolution des termes du bilan sont représentées afin de tester leurs sensibilités para rapport à ces paramètres.

Visiblement, il n'y a que l'*ETMc* qui présente des évolutions pratiquement identiques. Dans ce cas, l'imprécision sur la *RU* et la *CD* ne semble avoir aucune influence sur ce terme contrairement aux autres.

La croissance racinaire de la plante (*Cj*)

Elle mesure la vitesse de croissance journalière des racines. Les valeurs utilisées pour étudier son impact sur les termes du bilan hydrique sont définies dans le tableau suivant :

Tableau B.6.2.a2 – Les valeurs du paramètre racine pour l'analyse de sensibilité

<i>paramètre</i>	<i>valeur initiale</i>	<i>unité</i>	<i>variation (%)</i>	<i>mini /maxi (%)</i>
<i>Cj</i>	1	<i>cm/j</i>	2	-10 / 10

Identiquement aux cas précédent, la variation de la vitesse de croissance racinaire ne semble pas perturber l' *ETMc* (voir **Figure F.4.3 Annexe. Page 65**). Alors, les paramètres du système sol-plante n'ont un effet significatif que sur le *Dr*, l'*ETR* et sur le *ETR.ETMc* de la plante.

²⁴ Il s'agit des données obtenues sur les expérimentations canne à sucre à Sole E en 2008 de culture vierge. On est en condition d'irrigation mais il peut aussi avoir une situation pluvieuse ou une situation de sécheresse.

b. Analyse de sensibilité des données d'entrée

Il s'agit du Kc et de l' ETP et sont des courbes d'évolution contrairement aux paramètres. Pour étudier leurs sensibilités, nous avons associé un certain bruit ou un pourcentage de variation sur l'ensemble de leurs valeurs afin d'étudier leurs impacts sur les termes du bilan.

Le tableau ci-dessous présente ces derniers avec des valeurs pour l'étude de sensibilité. Les valeurs de référence ne sont pas affichées car elles varient dans le temps.

Tableau B.6.2.b – Les valeurs des données d'entrée pour l'analyse de sensibilité

<i>paramètre</i>	<i>valeur initiale</i>	<i>unité</i>	<i>variation (%)</i>	<i>mini/maxi (%)</i>
Kc		<i>s.u</i>	2	-10 / 10
ETP		<i>mm/j</i>	2	-10 / 10

Leurs variations entraînent une forte variabilité sur l'ensemble des termes du bilan hydrique étudiés (voir **Figure F.4.4** et **Figure F.4.5, Annexe 4. Page 66**). L' $ETMc$ qui était insensible sous la contrainte des paramètres semble cette fois ci être perturbée par l'imprécision de ces données d'entrée. On constate partout que les trajectoires ne sont pas du tout confondues. De plus, il y a une forte variabilité avec le taux de satisfaction des besoins en eau. La sensibilité de ces variables étant déterminée qualitativement, alors c'est par une méthode quantitative qu'on saura leurs importances sur les termes du bilan.

B.7. Méthodes de calcul des indicateurs de sensibilité des termes du bilan

B.7.1. Définition du modèle

Il s'agit d'associer un modèle correspondant aux courbes d'évolution des termes du bilan hydrique de la canne sur la période de culture.

Pour chaque terme, on considère le modèle :

$$y_i = f(x_i, \theta_i) \text{ pour tout } i = 1, \dots, n$$

Où

- n est le nombre de jours après le début du cycle (365 jours)
- i indique le jour en cours
- x_i est une donnée d'entrée et θ_i est un paramètre tous deux associés au terme du bilan considéré. On pose $v_i = (x_i, \theta_i)$
- y_i est un vecteur de valeurs simulées durant le cycle de culture annuel pour chaque variable d'entrée considérée. Il correspond aussi aux valeurs de référence d'un terme du bilan hydrique.

Le modèle devient :

$$y_i = f(v_i) \text{ pour } i = 1, \dots, n$$

correspondant ainsi aux valeurs qu'on obtient avec une simulation dite normale de Probe-w. Par conséquent, la variable v_i n'aura qu'une seule valeur identique durant tout le cycle. Dans le cas où la simulation est faite pour l'étude de sensibilité, on réécrit à nouveau le modèle précédent en tenant compte de toutes les valeurs simulées pour chaque valeur du paramètre considéré pris dans son domaine d'incertitude. Ainsi on a :

$$y_{i,j} = f(v_{i,j}) \text{ pour tout } j = 1, \dots, p, \text{ avec } i = 1, \dots, n$$

Où

- p est le nombre de valeurs prises par la variable considérée autour de sa valeur de référence
- j parcourt le domaine de variation de cette même variable.
- $v_{i,j}$ représente la valeur prise par la variable considérée pour simuler les valeurs correspondantes au terme du bilan en cours.
- $y_{i,j}$ sont les valeurs simulées pour un cycle de culture et pour une valeur prise par la variable d'entrée sur son domaine d'incertitude.

Ainsi, l'approche générale que nous allons utiliser pour étudier l'imprécision sur les termes du bilan serait de comparer les simulations du modèle avec les valeurs de référence pour chaque entrée du modèle. Pour ce faire, nous travaillerons avec le même modèle en considérant que les :

- $y_{i,0}$ sont les valeurs de référence d'un terme du bilan durant le cycle annuel de culture
- $v_{i,0}$ est la valeur de référence d'une entrée pour étudier la sensibilité d'un terme du bilan.

B.7.2. Méthodes de calcul des indicateurs de sensibilité

Le modèle défini précédemment nous permet d'étudier la sensibilité des variables d'entrée sur les termes du bilan hydrique. Nous espérons alors identifier les besoins d'information sur l'erreur de mesure par une comparaison des données simulées et de ceux observées sur le site d'expérimentation Sole E. Il peut s'agir d'une source d'erreur particulière (les données d'entrées, la forme des équations ou les paramètres) ou du type d'environnement à savoir des conditions pluviales contrastées ou des conditions de sécheresse. Pour ce faire, l'un des critères à utiliser est l'erreur quadratique moyenne entre les données simulées et les données observées²⁵. Elle est utilisée par P LANGELLIER et al.²⁶ comme suit :

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i,j} - y_{i,0})^2} \text{ pour tout } j = 1, \dots, p$$

²⁵ Ces dernières correspondent à la simulation de Probe-w sans l'option analyse de sensibilité.

²⁶ P. Langellier, A. Tediosi, P. Letourmy, M. Giner – Sensitivity of the KANEAU irrigation management model applied to agrindustrial sugarcane complexes

C. Résultats et Discussions

C.1. Les indices de sensibilité des variables d'entrée de Mosicas

Il s'agit de présenter les résultats numériques obtenus par la technique d'*ANOVA* présentée dans **B.5.2** (Page 26). Les tableaux représentés dans l'**Annexe 5, Page 66**, comportent :

- les sept essais d'expérimentation : *BXT15_99* (Barau), *CO457099* et *COP2_96* (Colimaçons), *LPSE1_95* (Ligne Paradis), *TI99*, *TIIRR98* et *TISTR98* (Tirano)
- les paramètres plantes à étudier leurs sensibilités
- les incertitudes du modèle qui résulte dans l'incertitude des paramètres considérés : la moyenne et la variance estimées
- les écarts de prédiction calculés entre valeurs simulées et valeurs observées
- les indices de sensibilité due aux mêmes paramètres.

Les résultats de l'analyse d'incertitude indiquent à la fois quelles sont les parcelles d'expérimentation susceptibles de générer une forte production annuelle de biomasse aérienne et une estimation de la variance liée aux entrées en supposant que le modèle est exact.

Pour analyser la sensibilité des paramètres, on a réalisé une **ANOVA** sur les modèles de régression (**Pages 26 et 70**) obtenus et on a calculé les indices de sensibilité correspondants. Mais au préalable, on a vérifié la pertinence de l'analyse linéaire par paramètre sur chaque essai tout en mettant en évidence les graphiques de régression (**Annexe 2, Page 52**) et l'hypothèse de normalité des erreurs d'ajustement ($\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$) des modèles. En effet, le test de normalité de **Shapiro** et **Wilk** sur les résidus des modèles donne parfois une probabilité supérieure au seuil habituel de 5% : $p_{value} > 5\%$. Dans ce cas, on ne peut pas rejeter le fait que ces erreurs soient supposées Normales. Donc, on peut déterminer les indices de sensibilité en faisant le rapport entre la variance du modèle et la variance totale. Dans le cas contraire, on dit que l'analyse linéaire n'est pas pertinente pour mesurer la sensibilité de certains paramètres.

C.1.1. Exemples de paramètre « plante » relatifs à l'action de l'indice foliaire

Le **Tableau F.5.2 (Annexe 5. Page 67)** montre une meilleure estimation de la quantité annuelle de *msa* ($61,24 \text{ tonnes.m}^{-2}$) sur la parcelle *LPSE1_95* de Lignes Paradis sous l'effet de la variation du paramètre *laicroi*. De plus, on a obtenu une très grande variabilité sur Barau (*BXT15_99*) à cause de la détermination de l'écart-type estimée. Cependant, les indices de sensibilité calculés sont très faibles sur l'ensemble des essais sauf pour *COP2_96* de Colimaçons où la sensibilité y est très forte. On a noté également des pentes assez différentes traduisant ainsi une hétérogénéité de la sensibilité de la *msa* à 12 mois.

Par contre, une petite variation de la température seuil d'élongation de croissance de l'indice foliaire, a entraînée une forte sensibilité de ce paramètre sur l'essai *BXT15_99* situé à Barau et une moyenne ou une faible selon les essais restants. De plus, les pentes observées sont assez sensiblement

différentes sur les sites Barau, Lignes Paradis et Colimaçons. Cependant, un effet seuil est observé sur les essais situés à Colimaçons.

Dans ces situations, le type d'essai a sans doute un effet significatif pour ces deux paramètres. En plus de la nature de l'environnement des parcelles étudiées, les variabilités des deux paramètres ont un effet différent sur la biomasse aérienne produite à 12 mois car l'écart type calculé pour le paramètre *laib* est plus fort que celui calculé pour le *laic*.

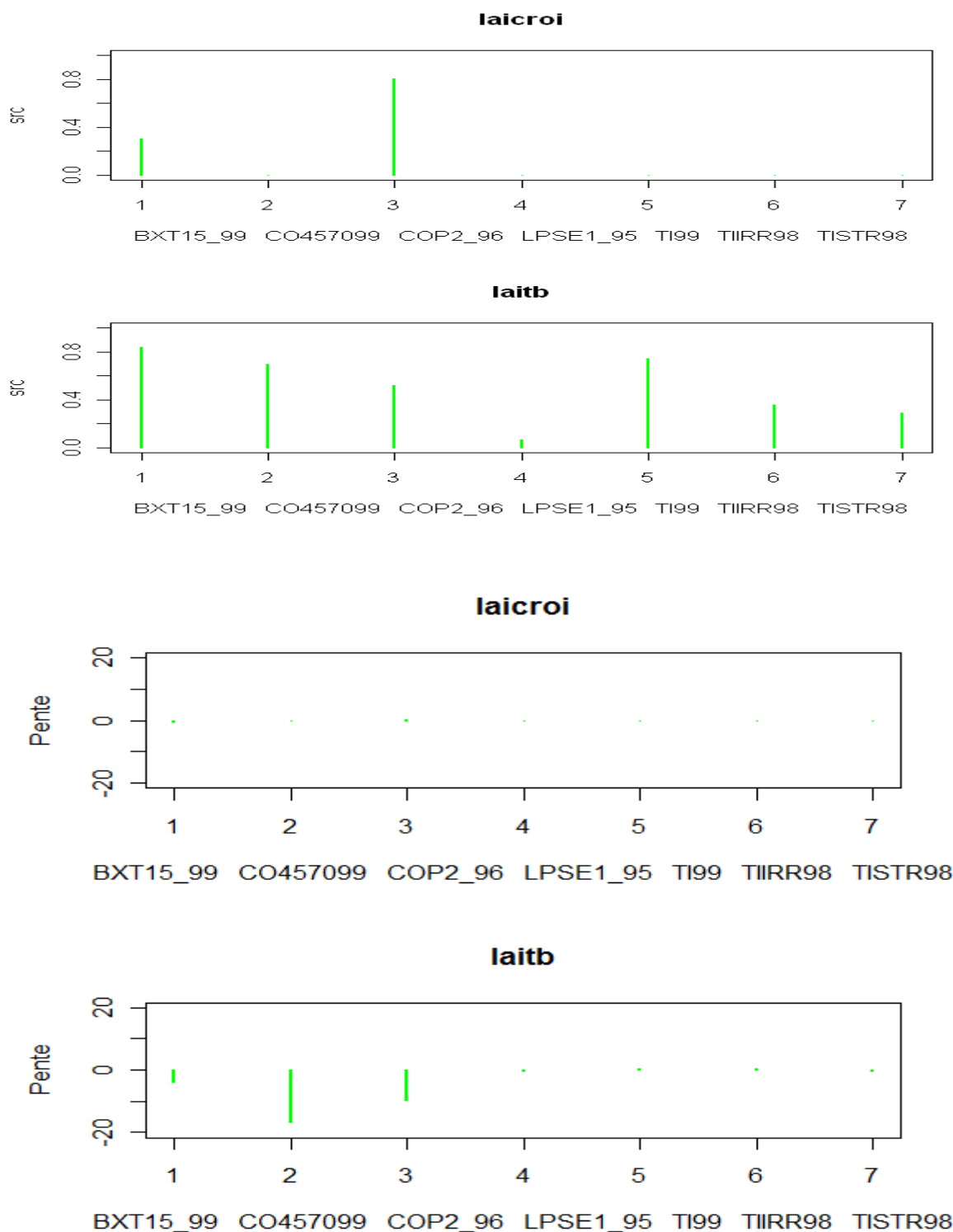
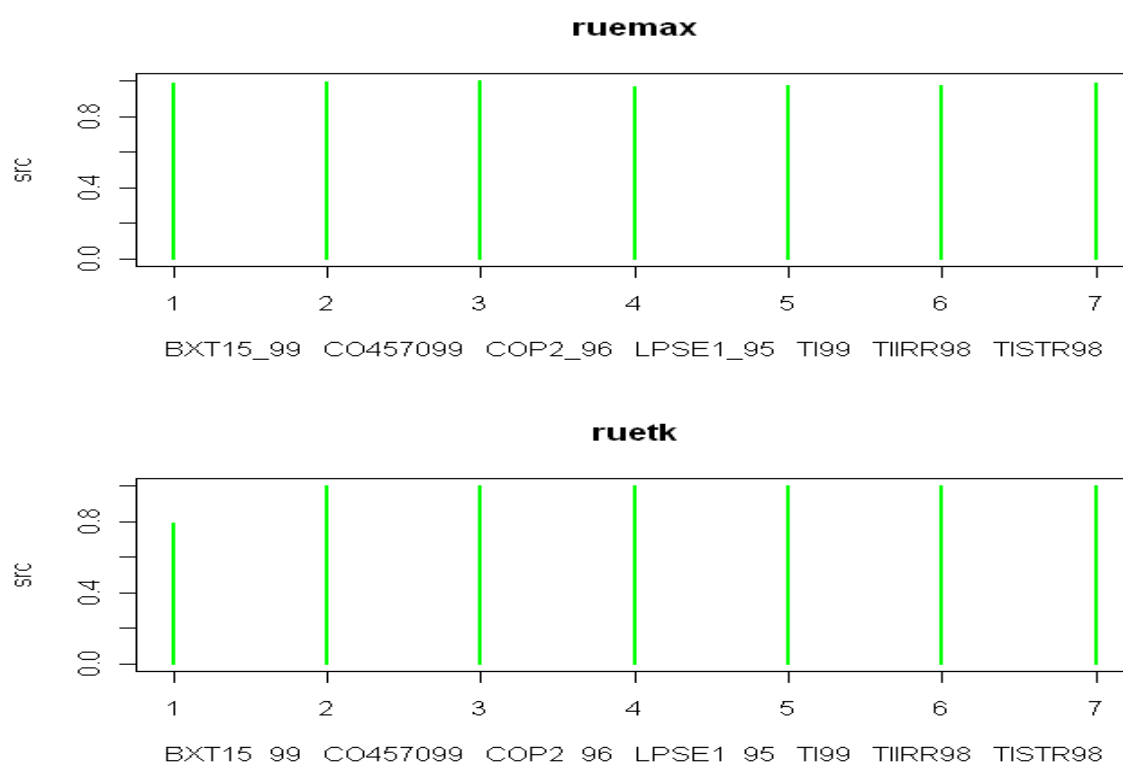


Figure C.1.1 – Les indices de sensibilité à la biomasse aérienne produite à 12 mois sous l’effet de la variation des paramètres *laicroi* et *laithb*

C.1.2. Exemples de paramètre « plante » relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse

Le **Tableau F.5.4. (Annexe 5. Page 71)** montre une estimation de *msa* produite à 12 mois toujours dominée par l’essai situé à Ligne Paradis pour les paramètres *ruemax* et *ruetk*. Quelque soit le lieu d’expérimentation, la sensibilité est forte pour chaque paramètre. Mais elle est beaucoup plus forte avec le paramètre *ruemax* qu’avec *ruetk*. Car une petite variation du paramètre *ruemax* fait beaucoup bouger la matière sèche aérienne produite à 12 mois. D’où la présence de très forts indices de sensibilité.

Mais, une vue globale des indices calculés met en exergue un indice relativement faible pour *BXT15_99* quand c’est l’effet de la température sur la conversion qui varie contrairement au reste. De plus, les pentes sont partout stables et assez sensiblement différentes quand on considère séparément les deux paramètres. Seulement, une surestimation du paramètre *ruemax* entraîne une surestimation de la *msa* à 12 mois contrairement à la surestimation du paramètre *ruetk* qui provoque une sous-estimation de cette matière sèche.



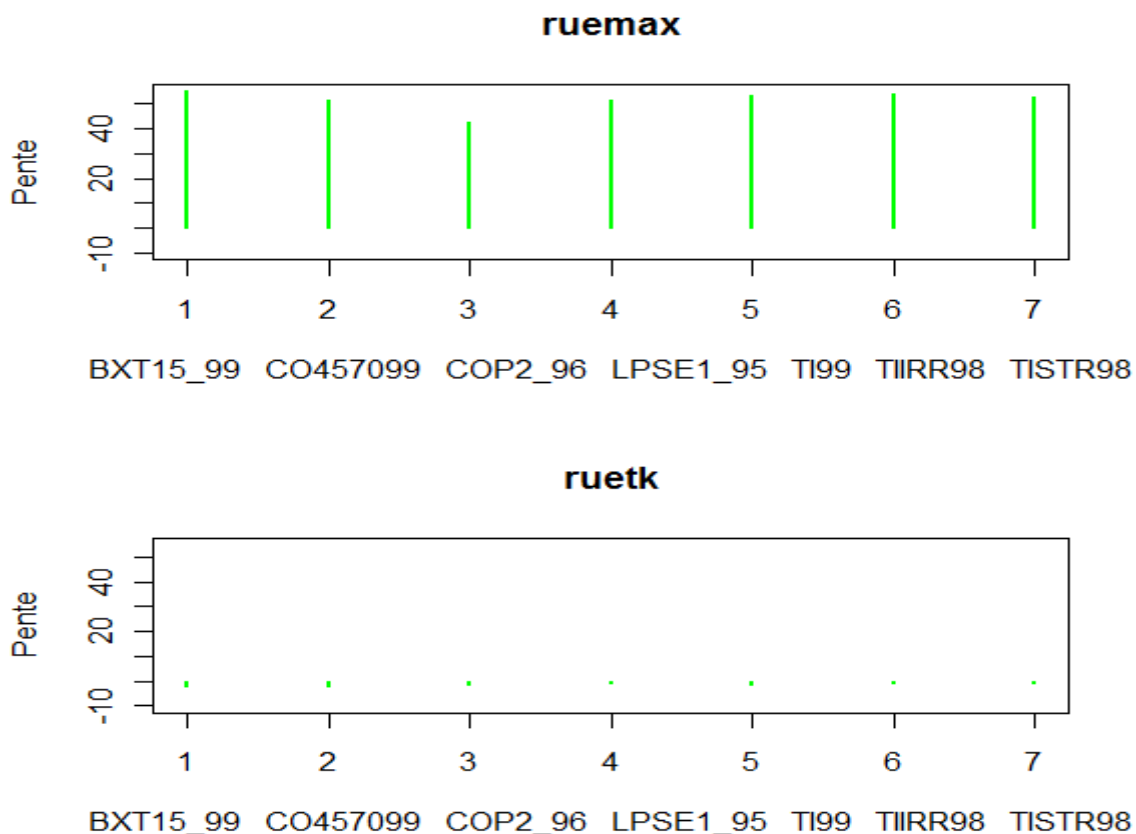


Figure C.1.2 – Les indices de sensibilité à la biomasse aérienne produite à 12 mois sous l’effet de la variation des paramètres *ruemax* et *ruetk*

L’analyse de sensibilité de ces paramètres a permis ainsi d’étudier la variance de l’erreur de prédiction de Mosicas pour des exemples de paramètres considérés ci-dessus. D’ailleurs, l’étude des écarts de prédiction entre valeurs simulées par *Mosicas.exe* et valeurs observées a donné des écarts beaucoup grands pour *ruemax* que pour *ruetk*.

C.1.3. Synthèse des résultats

On rappelle que l’on s’intéresse à la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois en $t.m^{-2}$ par la canne à sucre sur les différents essais d’expérimentation. Pour ce faire, on a analysé la sensibilité des paramètres ou données d’entrée qui influe de manière notable sur la biomasse aérienne produite.

Les paramètres plantes relatifs à l’action de l’indice foliaire

Dans le **Tableau F.5.1 (Annexe 5, Page 69)**, on a rappelé les définitions des paramètres utilisés ainsi que leurs valeurs à la plantation (ou vierge) et à la repousse afin de définir les options de simulation correspondantes pour analyser leurs sensibilités sur la matière sèche aérienne produite.

Dans le **Tableau F.5.2 (Annexe 5, Page 69)**, on a mis en exergue les paramètres les plus importants à la production de la matière sèche aérienne sur chaque site d’expérimentation avec les indices de

sensibilité et de ceux traduisant une grande instabilité de production sur l'ensemble des sites avec le calcul des pentes de la régression.

Sur tous les cas étudiés, la production de biomasse aérienne optimale n'est obtenue qu'avec l'essai *LPSE1_95* de Ligne Paradis et la dispersion autour de la moyenne est plus ou moins forte selon les paramètres et les essais étudiés.

Les indices de sensibilité des paramètres *laicroi* et *laitb* sont respectivement élevés sur les essais *COP2_96* de Colimaçons et *BXT15_99* de Barau. La biomasse aérienne produite n'est donc sensible à la vitesse de croissance de l'indice foliaire ainsi qu'à la température seuil d'élongation de l'indice foliaire que sur ces deux sites d'expérimentation.

De plus, avec ces deux paramètres, on a constaté une grande instabilité due à la nature des pentes des régressions correspondantes. En effet, ils agissent différemment sur les essais. Par exemple : la perturbation du *laicroi* abaisse la quantité de *msa* produite à Barau et l'accroît sur les autres essais. Celle du *laitb* agit de la même manière aux essais TI99 et TIIRR98 de Tirano.

Par contre, les sites Colimaçons, Lignes Paradis et Tirano se distinguent par une sensibilité plus ou moins faible en valeur absolue des paramètres : *laideb*, *laidebsen*, *laitksen* et *laiwsen*. On a noté également une forte stabilité de la nature des pentes sur l'ensemble des essais sauf pour Barau où elle est moins importante. D'ailleurs, les figures ci-dessous mettent en évidence toutes ces caractéristiques.

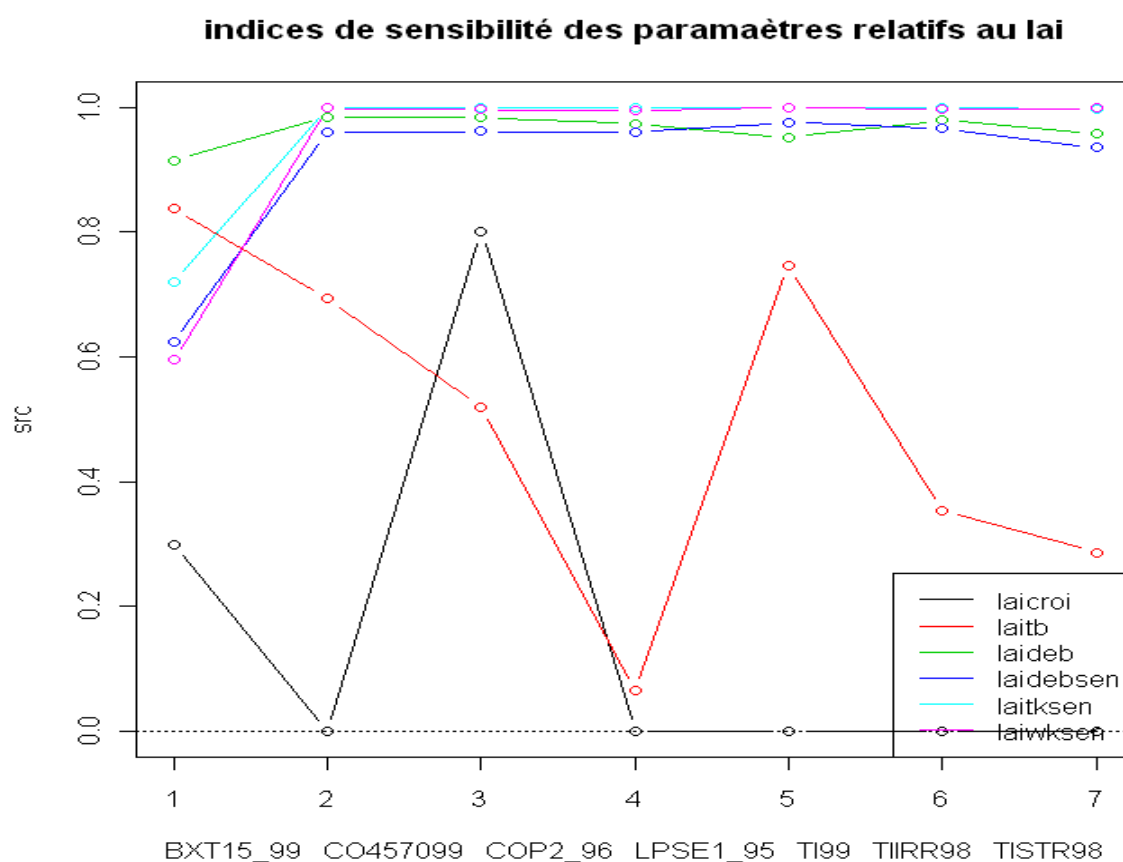


Figure C.1.3.a – Comparaison des indices de sensibilité *src* des paramètres relatifs au lai

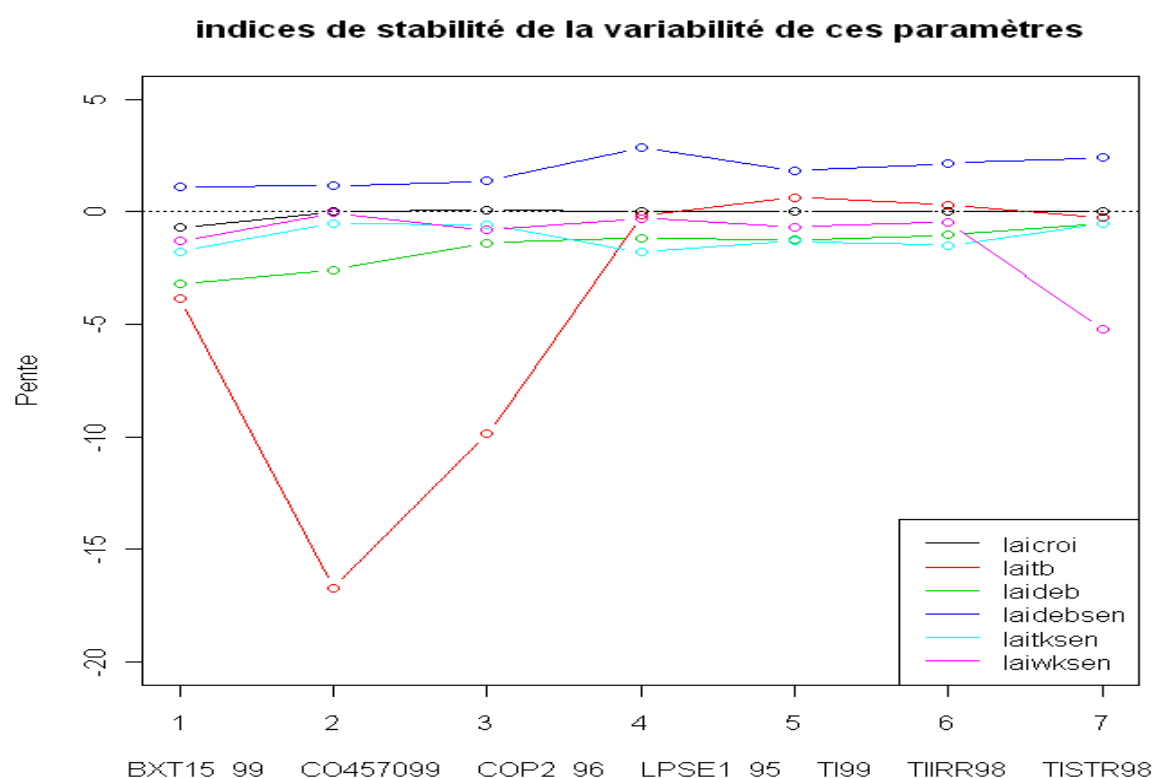


Figure C.1.3.b – Comparaison des pentes de la régression sur les paramètres relatifs au lai

Les paramètres plantes relatifs à la conversion en biomasse

La production de biomasse aérienne est toujours optimale sur l'essai *LPSE1_96* à Ligne Paradis. Mais l'écart-type est encore plus ou moins grande selon le site d'expérimentation et le paramètre étudié.

Sur tous les essais, les indices de sensibilité des paramètres *ruemax* et *ruetk* sont fortement élevés. Mais les pentes de la régression correspondantes sont stables et sont beaucoup plus significatives avec *ruemax* qu'avec *ruetk*.

Avec un indice de sensibilité très faible, la sensibilité du paramètre *ruetk* est presque nulle. Tous les résultats de ces calculs sont représentés dans les figures ci-dessous.

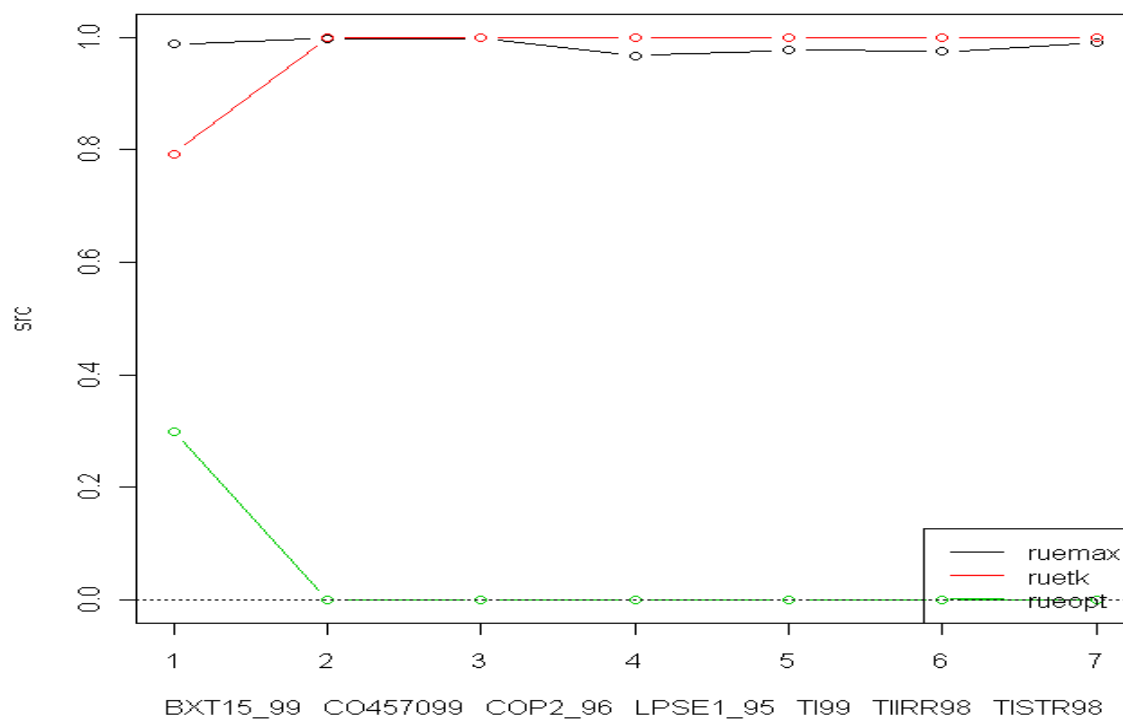


Figure C.1.3.c – Comparaison des indices de sensibilité *src* des paramètres relatifs à la conversion en biomasse

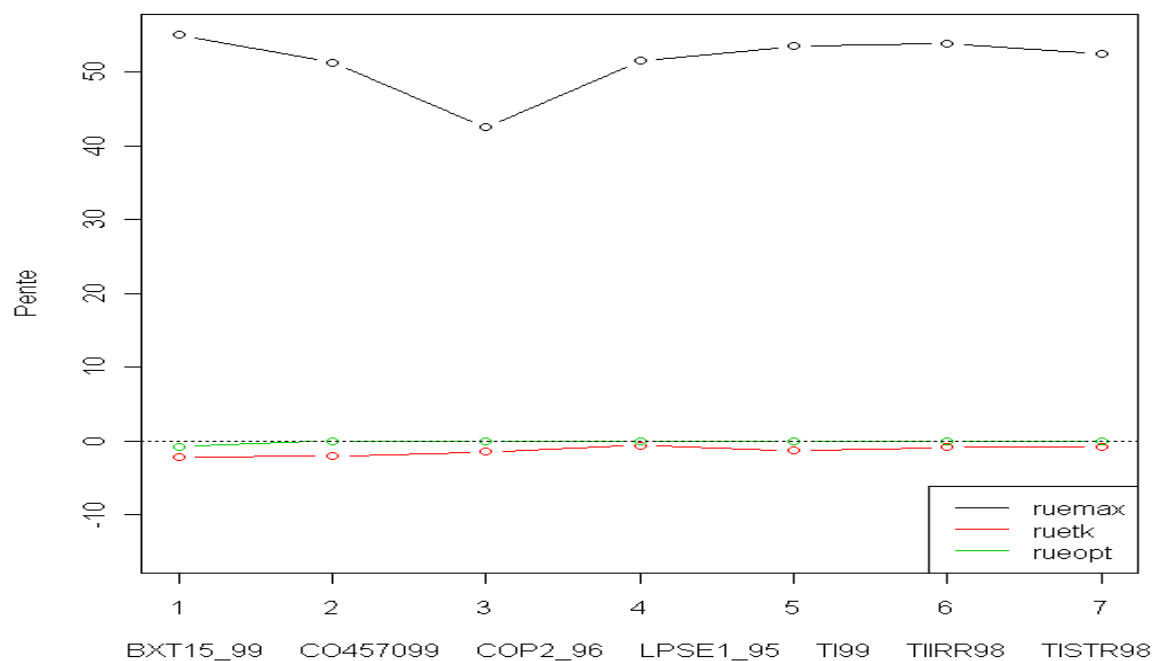


Figure C.1.3.d – Comparaison des pentes de la régression sur les paramètres relatifs à la conversion en biomasse

C.2. Indicateurs de sensibilité des variables d'entrée de Probe

On rappelle que l'on désire identifier les paramètres et les données d'entrée qui influent de manière notable sur les termes du bilan hydrique de la canne à sucre. Pour ce faire on a fait varier leurs valeurs standards sur leurs domaines de variation séparément : un intervalle de variation pour les scalaires et un bruit associé à ceux ayant une courbe d'évolution comme valeur initiale. Enfin, ces valeurs sont comparées aux valeurs de référence grâce à l'écart quadratique moyen.

C.2.1. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation de la réserve utile

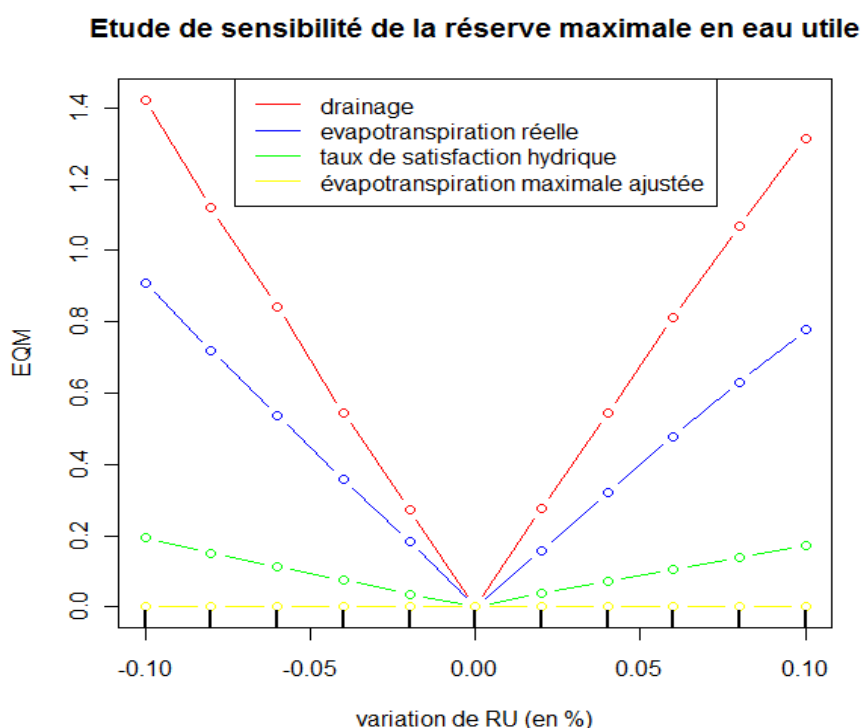


Figure C.2.1 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la réserve utile

On obtient la même variation mais à des taux différents. En effet, le Dr fournit le plus grand écart quadratique moyen, ensuite viennent successivement l' ETR et l' $ETR.ETMc$. Cependant, on n'observe pas d'effet de la réserve utile sur l'évapotranspiration maximale ajustée $ETMc$ car les écarts quadratiques moyens calculés pour ce terme du bilan sont nuls quelque soit la quantité d'eau dans le sol.

Ainsi, on en déduit que le drainage est beaucoup plus sensible à la variation de la réserve maximale en eau utile. Ensuite, on a l'évapotranspiration réelle et le taux de satisfaction des besoins en eau qui sont faiblement sensibles. On peut donc dire que la réserve maximale en eau utile (RU) est importante pour ces trois termes du bilan hydrique.

C.2.2. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la variation de la cote de drainage

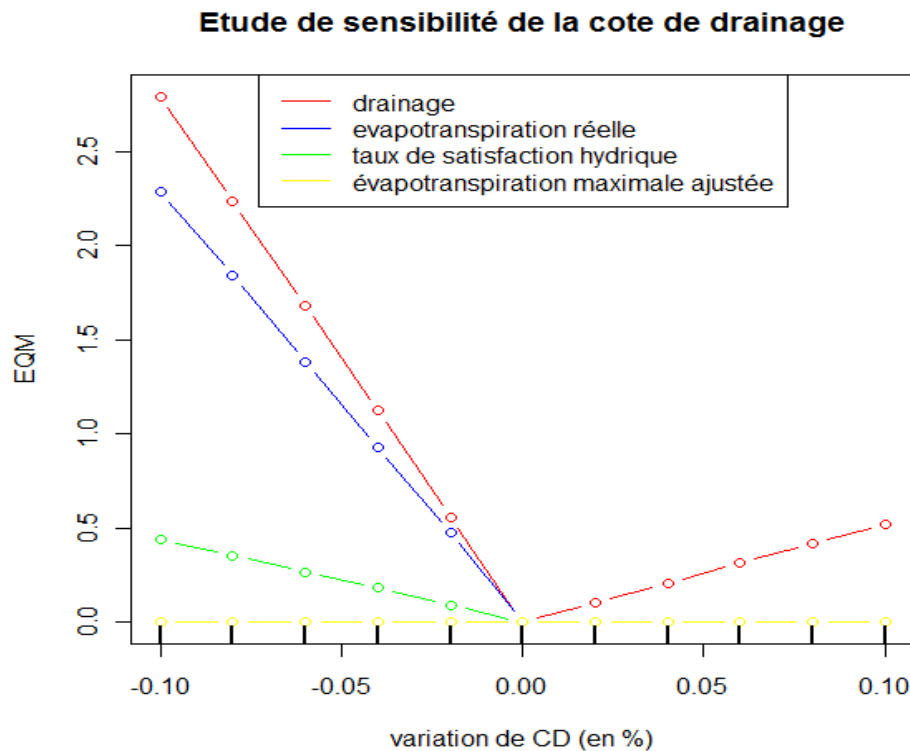


Figure C.2.2 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la cote de drainage

Les écarts quadratiques moyens calculés pour le drainage et l'évapotranspiration réelle sont beaucoup plus élevés que ceux du taux de satisfaction des besoins en eau. Ce qui s'explique lorsque la profondeur maximale du système racinaire de la canne n'est pas atteinte ou lorsque la cote de drainage subit une baisse progressive en profondeur. On rappelle que ce paramètre représente la profondeur (explorée par les racines de la canne) à partir de laquelle l'eau ne sera plus utilisée par la plante. Donc, avant cette profondeur, la plante n'a probablement pas encore atteint son autosuffisance hydrique. Dans le cas contraire (une augmentation de la cote de drainage), on aura une évolution constante de la quantité initiale d'eau évaporée par le sol et transpirée par la plante et une satisfaction en eau pour son bon fonctionnement car c'est à partir de cette profondeur que débutera le drainage. D'ailleurs, sur cette partie de la figure, leurs écarts quadratiques moyens sont tous nuls et ceux du drainage atteignent une marge de 0.5.

L'*ETR* et l'*ETR.ETMc* sont sensibles à la cote de drainage qu'en cas de baisse de sa profondeur. Donc, comme le paramètre *RU*, la cote de drainage (*CD*) est aussi importante pour ces termes du bilan.

C.2.3. Indicateurs de sensibilité de l'effet de la vitesse de croissance racinaire

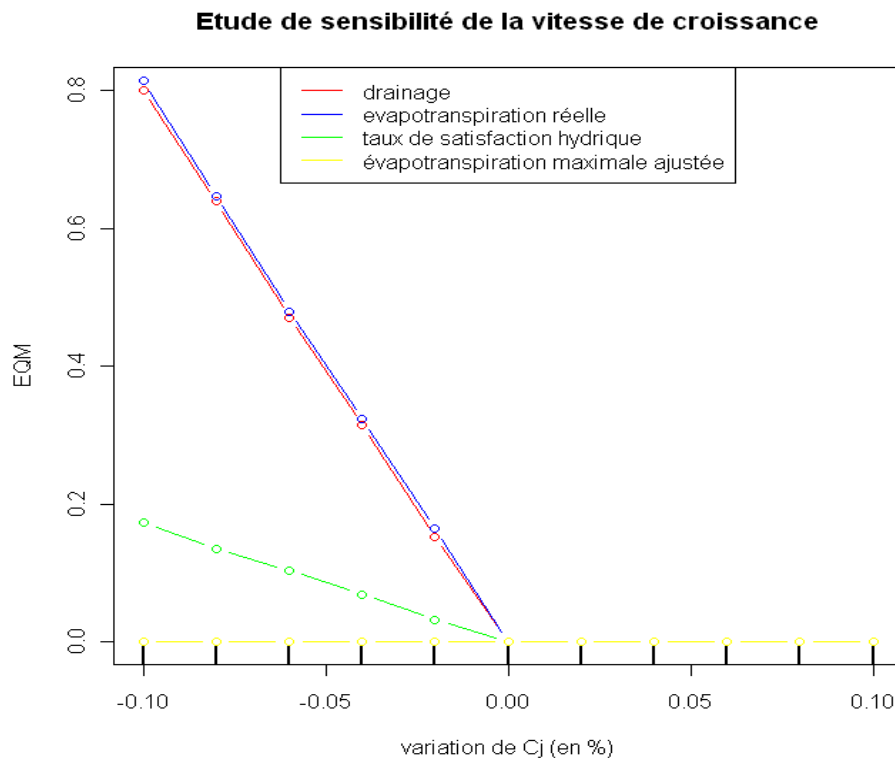


Figure C.2.3 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de la vitesse de croissance racinaire

Une baisse progressive de la vitesse de croissance des racines de la canne entraîne un agrandissement progressif des écarts quadratiques moyens estimés pour le Dr et l' ETR . Ils sont donc sensibles à cette variation partielle de la vitesse de croissance. Par contre, si les racines croissent plus par jour plus que ce que l'on considère (1cm par jour), tous les écarts seront nuls. Dans ce cas, le drainage n'est pas vraiment utile à la plante, les demandes en eau du climat dans l'atmosphère ne sont plus faites par le système sol-plante ainsi que le taux de satisfaction en eau. Une croissance rapide de ces racines entraîne rapidement un développement de la plante car ces racines puisent le maximum d'éléments minéraux et d'eau contenu dans le sol pour assurer un bon fonctionnement du processus de production de matière sèche végétale.

Ces termes du bilan hydrique sont bien tous sensibles à la variation de la vitesse de croissance racinaire. Ainsi, le paramètre est lui-même important pour ces termes du bilan.

C.2.4. Indicateurs de sensibilité de l'effet du coefficient cultural

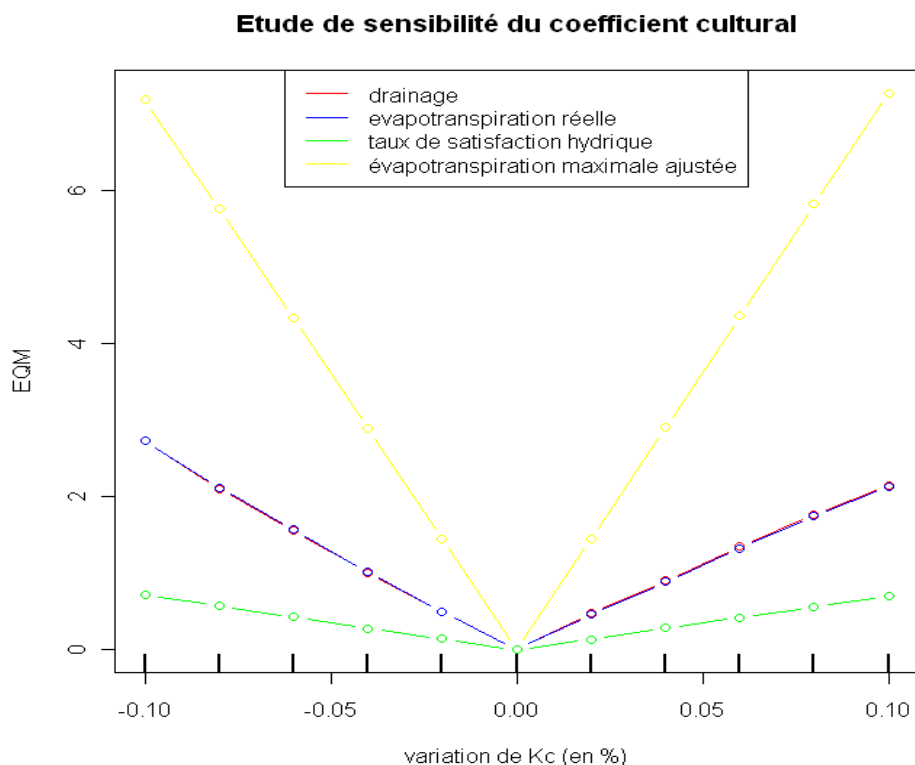
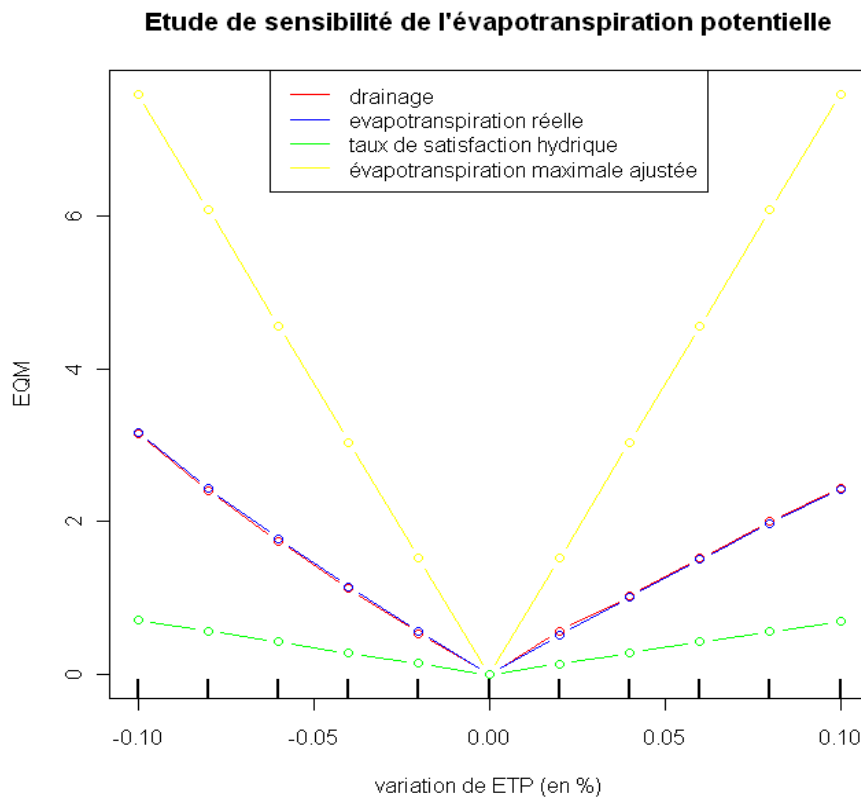


Figure C.2.4 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet du coefficient cultural

Les écarts sont nettement plus grands sur l' $ETMc$ que sur les autres termes du bilan hydrique de la canne. Cependant, avec le Dr et l' ETR , on a des écarts relativement moyens pour les considérer comme sensibles à la variation des valeurs du K_c . Ces derniers sont les taux de satisfaction journalière des besoins hydriques, minéraux et climatiques de la canne durant la période de culture. Ils caractérisent alors la croissance de la plante sur tous les compartiments. Par conséquent une variation progressive en baisse comme en hausse des coefficients culturaux traduisent respectivement une très forte, une moyenne et une faible perturbation pour l' $ETMc$; le drainage et l'évapotranspiration réelle (ETR) et l' $ETR.ETMc$.

C.2.5. Indicateurs de sensibilité de l'effet de l'évapotranspiration potentielle



Tapez une équation ici.

Figure C.2.5 – Les écarts quadratiques moyens des termes du bilan hydrique sous l'effet de l'évapotranspiration potentielle

Ces résultats sont presque identiques aux précédentes situations. Donc, sous l'effet de la variation des données pluviométriques, $L'ETMc$ est fortement sensible, le Dr et $l'ETR$ le sont moyennement et quant à $l'ETR$, $ETMc$ elle est faiblement sensible.

Le coefficient cultural et l'évapotranspiration potentielle sont donc toutes importantes à tous ces termes du bilan.

L'analyse de sensibilité de ces entrées a permis ainsi d'étudier uniquement la variance de l'erreur de prédiction de Probe. Cependant, il est important aussi d'analyser les biais des estimations par une comparaison entre les résultats de la simulation faite par *Probe* – *we* et des données observée de validation afin d'étudier la qualité de prédiction de Probe.

D. Conclusion

Bilan des résultats et limites de ce travail

Cette étude m'a permis de mettre en œuvre des modèles dynamiques de culture disposant chacun d'un outil de simulation basé sur le même principe : le modèle **Mosicas** étudiant la croissance et le développement de la canne à sucre ; le modèle **Probe** calculant le bilan hydrique de la canne dans le sol cultivé. L'application de ces derniers a nécessité la manipulation et l'utilisation de jeux de données complexes (situations d'expérimentation, itinéraires techniques, météo, sol, plante, observations, irrigation ...) et jeux de modules (le module de bilan hydrique et le module de croissance de Mosicas) de façon cohérente et conviviale.

Par rapport à la problématique première d'estimer l'erreur de prévision sur le bilan hydrique et la quantité de biomasse aérienne produite à 12 mois, une étude de sensibilité des variables d'entrée a été faite afin de mettre en évidence celles qui influent de manière notable sur les sorties des modèles étudiés. Il s'agit de l'étude de la variance de l'erreur de prédiction des modèles Mosicas et Probe. En effet, avec l'outil de simulation *Mosicas.exe*, on a simulé sur les sept parcelles d'expérimentation la matière sèche aérienne produite par la canne à sucre 12 mois après le début du cycle de culture. Grâce à une option de simulation de type sensibilité : on a fait varier certains paramètres afin d'obtenir l'impact de leurs imprécisions sur cette biomasse aérienne. L'outil de simulation de *Probe - w* a servi à calculer, pour chaque niveau de satisfaction des besoins en eau de la canne, son bilan hydrique par jour dans le sol. Grâce à une simulation de type sensibilité, on a testé la variabilité des termes comme l'évapotranspiration réelle et le drainage par rapport à l'imprécision des variables d'entrée correspondantes.

Sur les exemples de paramètres qu'on a utilisés pour étudier la sensibilité de la matière sèche aérienne, les résultats ont montré que les plus influents sont : le coefficient maximum de conversion en biomasse (**ruemax**), l'effet de la température sur la conversion (**ruetk**), les stades d'apparition de l'indice foliaire et du début de sénescence des limbes (**laideb** et **laidebsen**) et enfin les effets de la température et du stress hydrique sur la sénescence des limbes (**laitksen** et **laiwksen**). Quant aux entrées de Probe qu'on a étudié, nous avons : les indicateurs bioclimatiques l'évapotranspiration potentielle (**ETP**) et le coefficient cultural (**Kc**) ; la cote de drainage (**CD**) et la réserve maximale en eau utile (**RU**).

Les limites ont aussi été la non prise en compte par Mosicas et Probe de l'étude de sensibilité pour certaines données d'entrée. Pour pallier cette limite, il faudrait introduire un petit utilitaire permettant de « brouter » les courbes d'évolutions des données météo par exemple et mesurer l'impact sur les sorties par l'écart quadratique moyen.

Cependant, il reste à estimer l'espérance de l'erreur pour les termes du bilan hydrique et la production de biomasse aérienne de la canne à sucre. Pour ce faire, une confrontation entre les résultats de simulation et des données observées de validation est nécessaire sur les sites d'expérimentation correspondants. Il s'agit d'étudier le biais. Il faudrait prendre d'autres années de validation pour Mosicas et d'autres conditions d'alimentation hydrique contrastées ou d'introduire la sécheresse pour Probe afin d'estimer les espérances et les variances de l'erreur associées.

Expérience personnelle

A première vue, l'objectif du projet **C.A.S.D.A.R.**, auquel s'inscrit ce stage, associant statisticiens et modélisateurs, des instituts agricoles et des organismes de recherche agronomique afin de croiser les réflexions et échanger sur les aspects méthodologiques, m'a paru très pertinente. Il a été très valorisant pour moi que le travail fourni ait une application concrète *a posteriori*. De plus, grâce à cet objectif motivant, une progression personnelle, au cours de cette recherche, est toujours possible malgré les différents problèmes rencontrés de nature agronomique, statistique ou encore logicielle.

Par contre, un des points qui m'a plutôt ennuyé est de n'avoir trouvé que de rares références se rapportant à l'application des techniques d'analyse de sensibilité utilisées avec le logiciel R pour les données expérimentales que je dispose. Toutefois, à cette occasion, j'ai pu ainsi me perfectionner dans l'utilisation des modèles de cultures dynamiques et d'approfondir par la même occasion mes connaissances sur les techniques d'analyse de sensibilité que j'ai eu à rencontrer : on étudie l'influence d'une incertitude sur une analyse de sensibilité, et de voir s'il est possible de prendre en compte cette incertitude lors de l'analyse, ou encore lors de l'interprétation des résultats.

Bien que légèrement déçue par l'explication agronomique de certains résultats au cours de ce présent travail, ce fut également pour moi intéressant et instructif de construire toute une méthodologie pour parvenir à étudier ce dispositif agronomique spécifique.

Enfin, le travail en équipe m'a beaucoup apporté. Tout d'abord, les discussions avec les autres biostatisticiens m'ont permis de comprendre plusieurs points théoriques essentiels. De plus, les nombreux échanges avec les agronomes, qui eux connaissaient le terrain et le dispositif expérimental étudié car étant les concepteurs des modèles dynamiques utilisés, se sont révélés tant utiles dans la rédaction de ce rapport, que conviviaux.

Perspective d'ouverture

Ces travaux soulèvent finalement de nouvelles pistes. L'utilisation de Mosicas et de Probe nous a permis d'identifier séparément les variables d'entrée qui influent de manière notable sur la production de la biomasse aérienne annuelle et sur les termes de son bilan hydrique.

Cependant, il reste à mettre en évidence l'interaction plante, sol et atmosphère de manière synthétique sur l'ensemble de la saison. Pour ce faire, un troisième modèle dynamique de culture serait nécessaire pour une mise en œuvre afin de faire une nouvelle étude de sensibilité portant sur un ou plusieurs états du couvert de la canne à sucre par rapport à la variabilité des données paramétriques ou non de la plante. En plus de l'étude de la variance de l'erreur de prédiction, on déterminera les biais des estimations par confrontation entre les résultats de simulation et les valeurs de référence.

E. Références : bibliographiques et articles

- MARTINE J.F., TODOROFF P. – *Le modèle de croissance et sa plateforme de simulation Simulex : Etat des lieux et perspectives*. 10^{ème} congrès STASM (2002) Revue Agricole et Sucrière de l'île Maurice. 2002 Vol. 81. p133-147
- MARTINE J.F. – *Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. Thèse de doctorat* – 2003
INRA PARIS-GRIGNON
- CHOPART Jean Louis, MEZO L Le et MEZINO M. - *PROBE-w (PROgramme de Bilan de l'Eau) : logiciel de modélisation du bilan hydrique dans un sol cultivé. Présentation et guide d'utilisation* – 2009
CIRAD-CA station Ligne Paradis, 7 chemin de l'IRAT, 97410, St Pierre La Réunion.
chopart@cirad.fr
- CHOPART J.L., MEZINO M., AURE F., MEZO L. Le, METE M., VAUCLIN M. – *OSIRI : A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments* – 2006
CIRAD-CA station Ligne Paradis, 7 chemin de l'IRAT, 97410, St Pierre, La Réunion / Chambre d'Agriculture de La Réunion, BP 134, 97463 St. Denis, La Réunion / LTHe-UMR 5564 (CNRS, INPG, IRD, UJF), BP 53, 38041-Grenoble Cedex 9 – France
- LANGELLIER P., TEDIOSI A., LETOURMY P. et GINER M. – *Sensitivity of the KANEAU irrigation management model applied to agroindustrial sugarcane complexes* – 2009
CIRAD, UPR Systèmes de culture annuels, F-34398 Montpellier, France
langellier@cirad.fr
- CHOPART J.L. et VAUCLIN M. – *Water Balance Estimation Model : Test and Sensitivity Analysis* – 1990, CIRAD
- TITTONELL P., CORBEELS M., WIJK M.T. van, GILLER K.E. – *FIELD : A summary simulation model of the soil-crop system to analyse long-term resource interactions and interactions and use efficiencies at farm scale* – 2009
Plant Production Systems, Department of Plant Sciences, Wageningen University, The Netherlands / Systèmes de Cultures Annuels, CIRAD, France / Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture (TSBF-CIAT), Harare, Zimbabwe
Pablo.tittonell@cirad.fr
- BRUCHOU C. – *Méthodes Statistiques pour l'analyse de sensibilité globale des modèles : Les indices* – 2008 Unité de Biostatistique Processus Spatiaux INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) Avignon, France
<http://www.avignon.inra.fr/biometrie>
- MAKOWSKI D. – *Analyse d'incertitude et Analyse de sensibilité. Objectifs et principales étapes* – 2009, INRA
makowski@grignon.inra.fr
- MONOD H. – *Analyse de sensibilité : mesure de l'importance des facteurs par décomposition de la variance*. INRA – Unité MIA (Mathématiques et Informatiques Appliquées) de Jouy-en-Josas – 2009

- JACQUES J. thèse de doctorat – *Contribution à l'Analyse de Sensibilité et à l'Analyse Discriminante Généralisée.* – 2005
<http://math.univ-lille1.fr/~jacques/>
- SALTELLI A., CHAN K. et SCOTT E. M. – *Sensitivity Analysis.* JHON WILEY & SONS LTD – 2000
- FAUCONNIER R. – *La canne à sucre.* Maisonneuve et Larose et A.C.C.T., 1991
- TOMASSONE R. – *La régression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique.* MASSON, 1993

F. Annexes

F.1. Annexe 1 : Présentation de Mosicas et des données associées

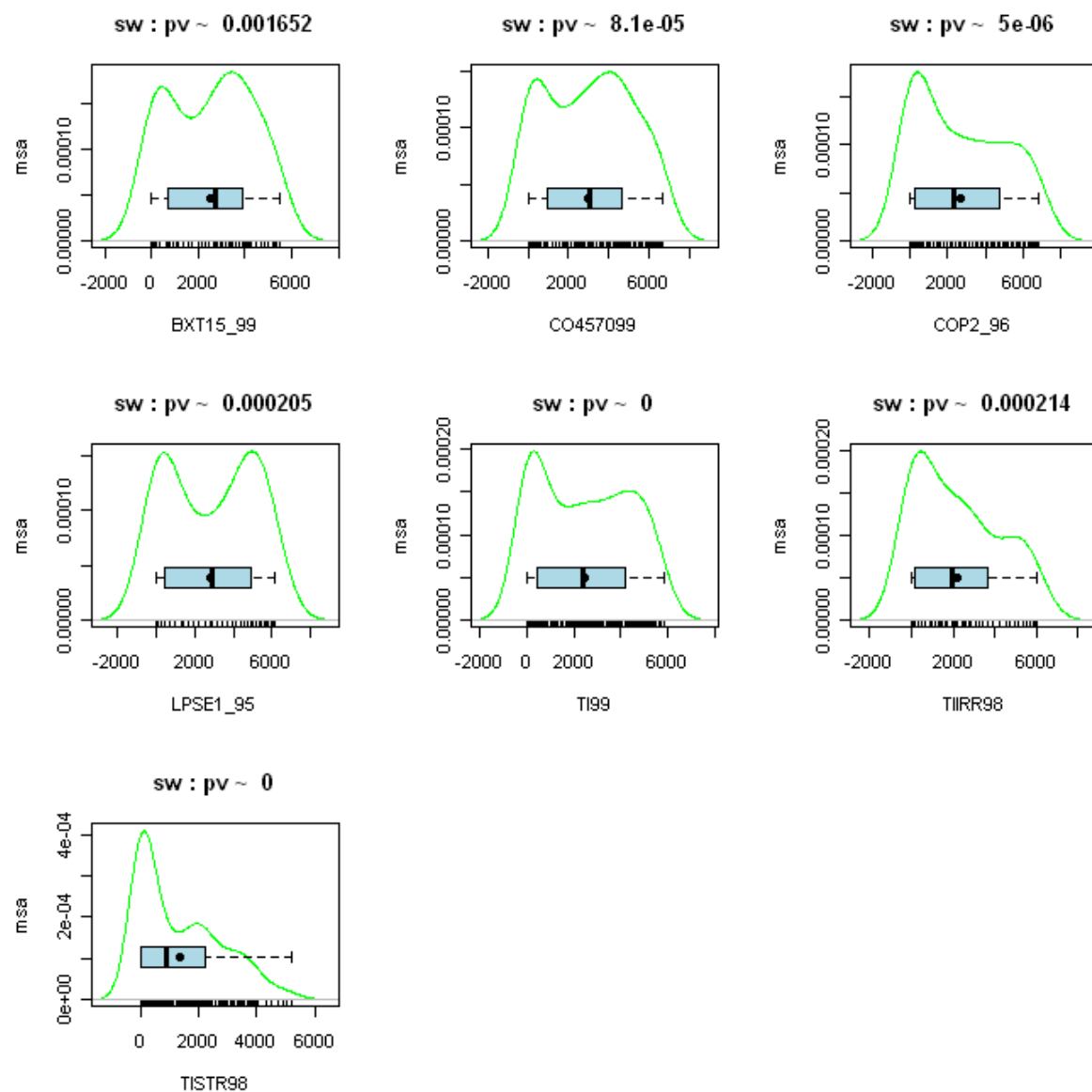


Figure F.1.1 – Densité et boîte à moustaches associées à la variable *msa* estimée sur différents sites d'expérimentation.

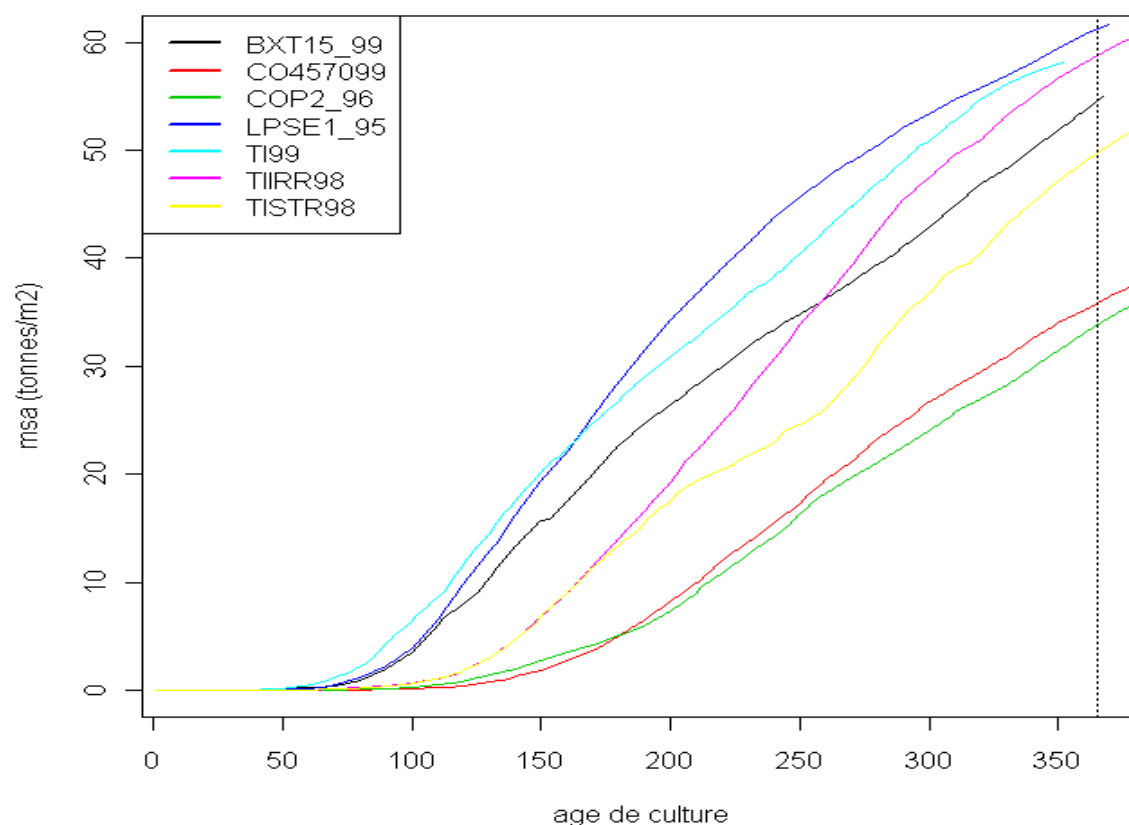


Figure F.1.2 – L'évolution de la matière sèche aérienne en fonction de l'âge de culture de la canne sur l'ensemble de sites d'expérimentation

Tableau F.1 – Les productions annuelles de matières sèches aériennes sur tous les sites d'expérimentation de culture de la canne

<i>code_essai</i>	<i>age (jours)</i>	<i>msa (t/m²)</i>
BXT15_99	367	54.99
CO457099	370	36.49
COP2_96	370	34.53
LPSE1_95	369	61.65
TI99	352	58.19
TIIRR98	370	59.35
TISTR98	370	50.46

F.2. Analyse de sensibilité des variables d'entrée de Mosicas

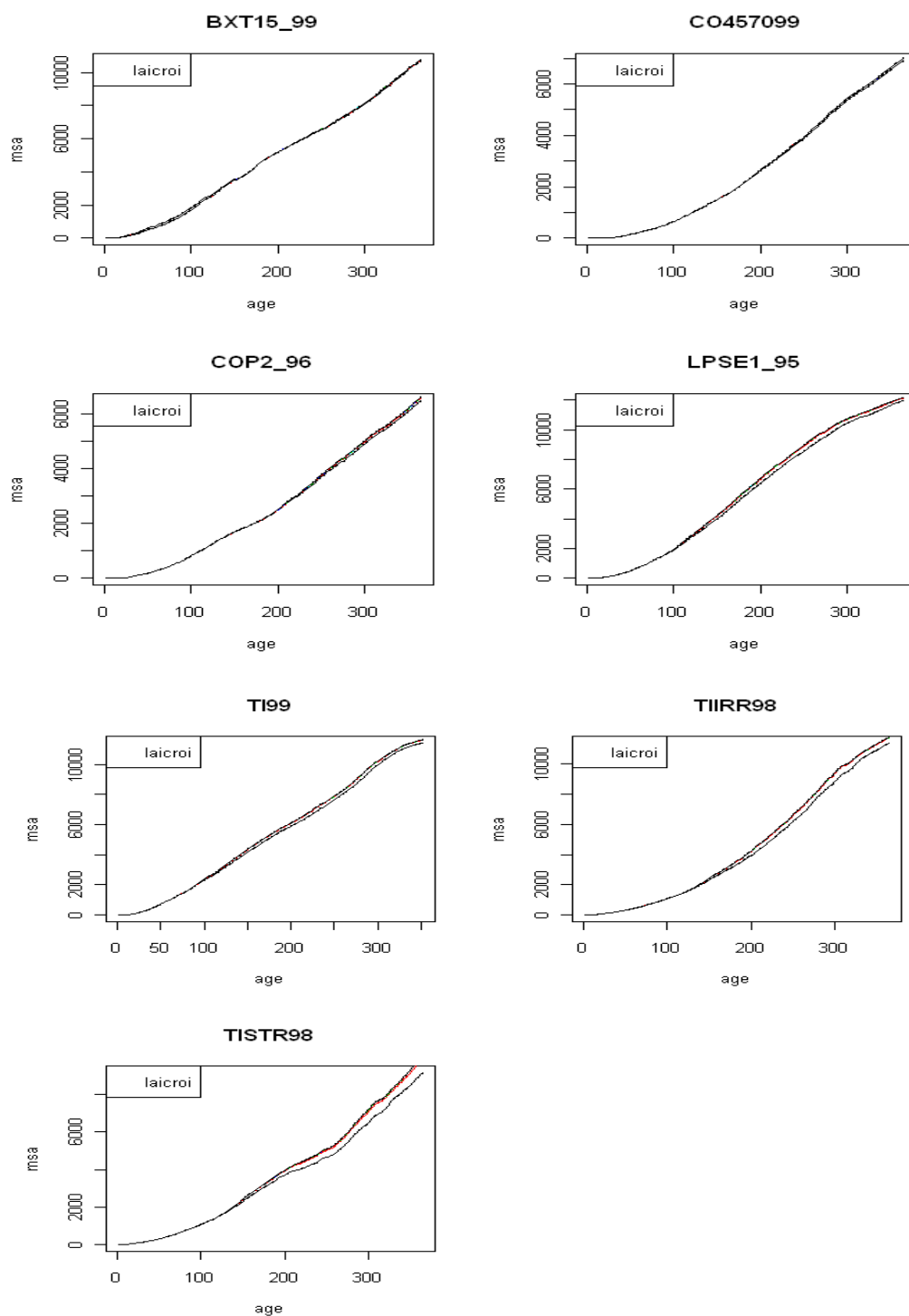


Figure F.2.1.a1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation du *laicroi*

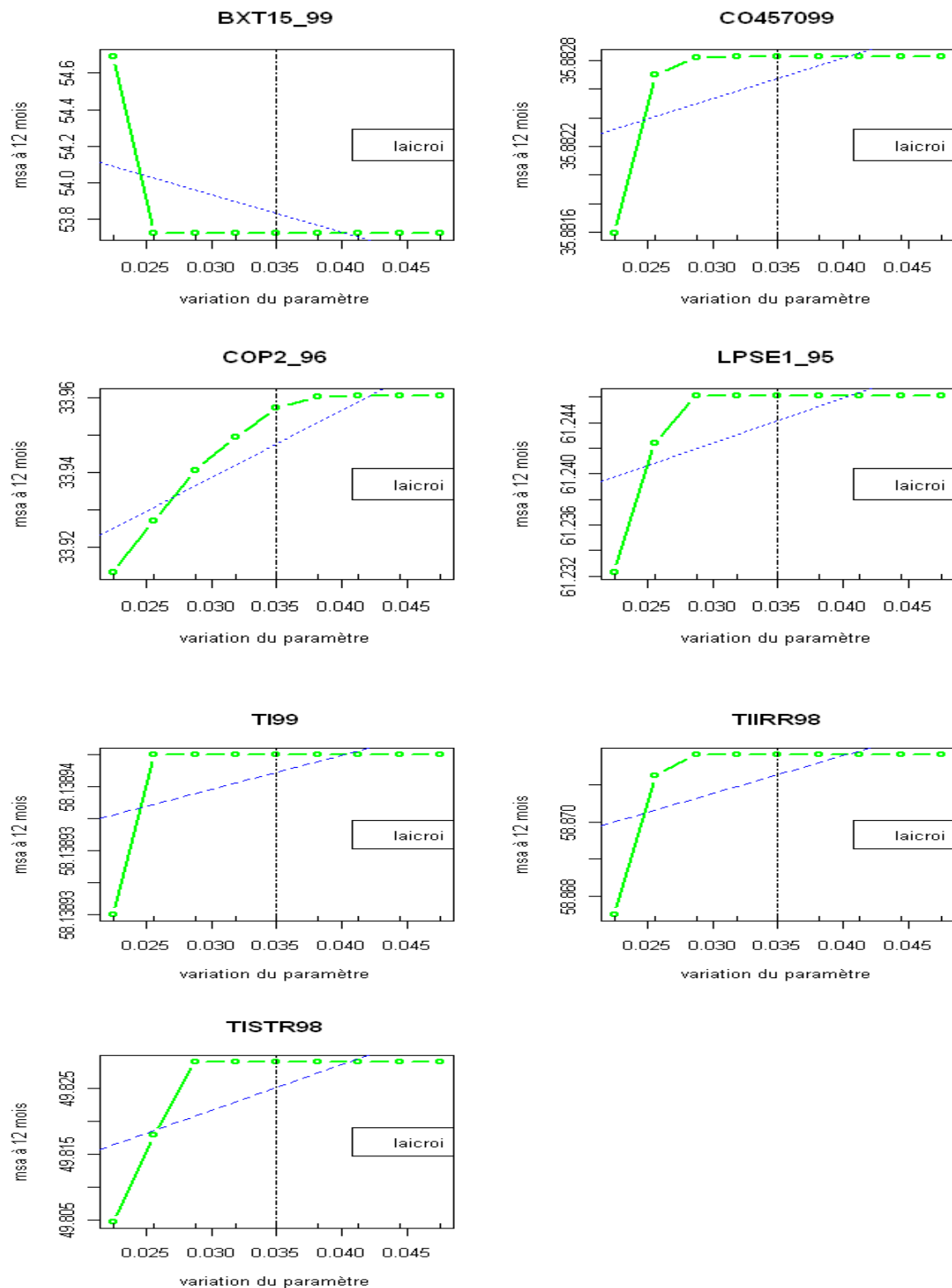


Figure F.2.1.a2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *laicroi*

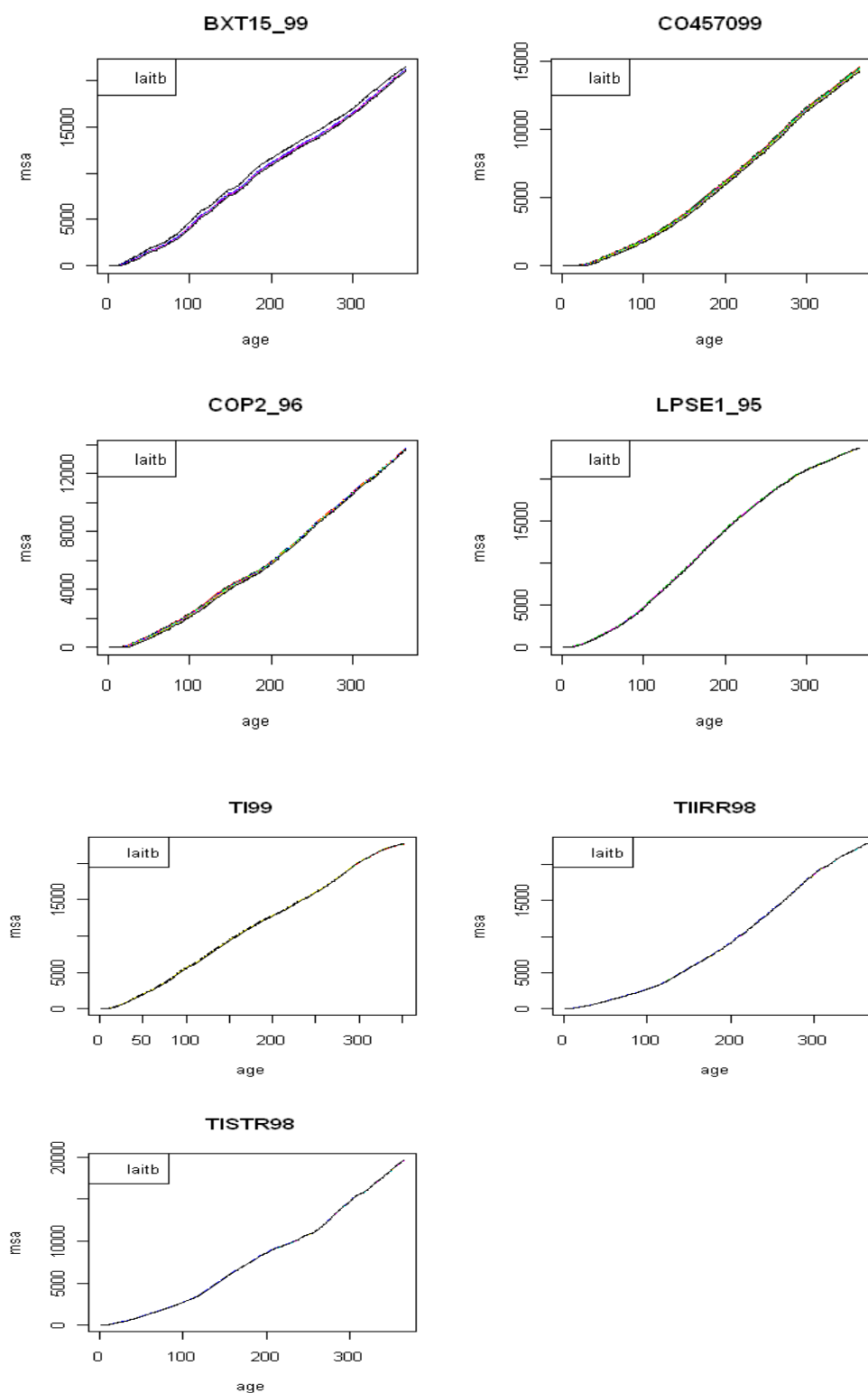


Figure F.2.2.b1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *laitb*

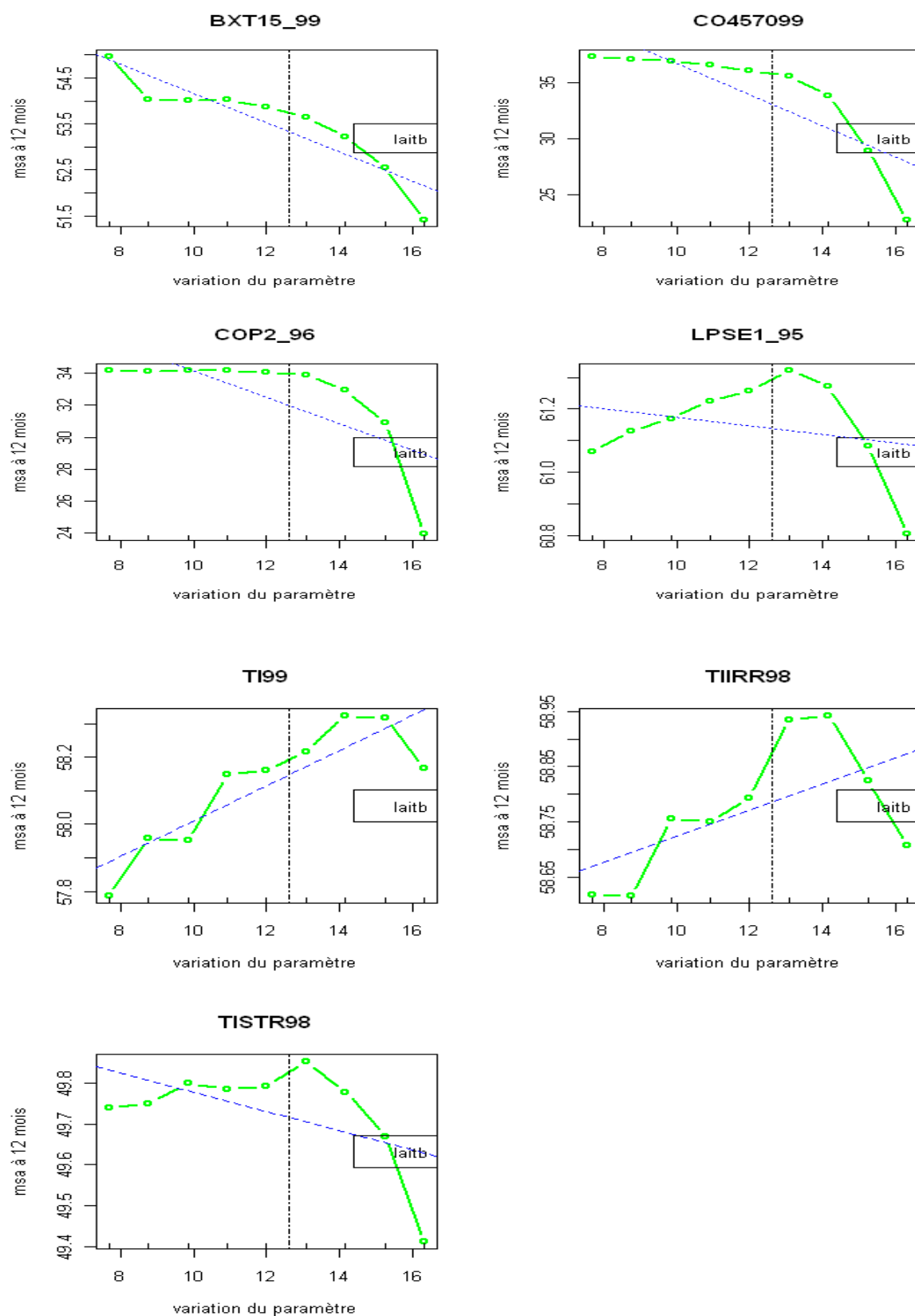


Figure F.2.2.b2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *laitb*

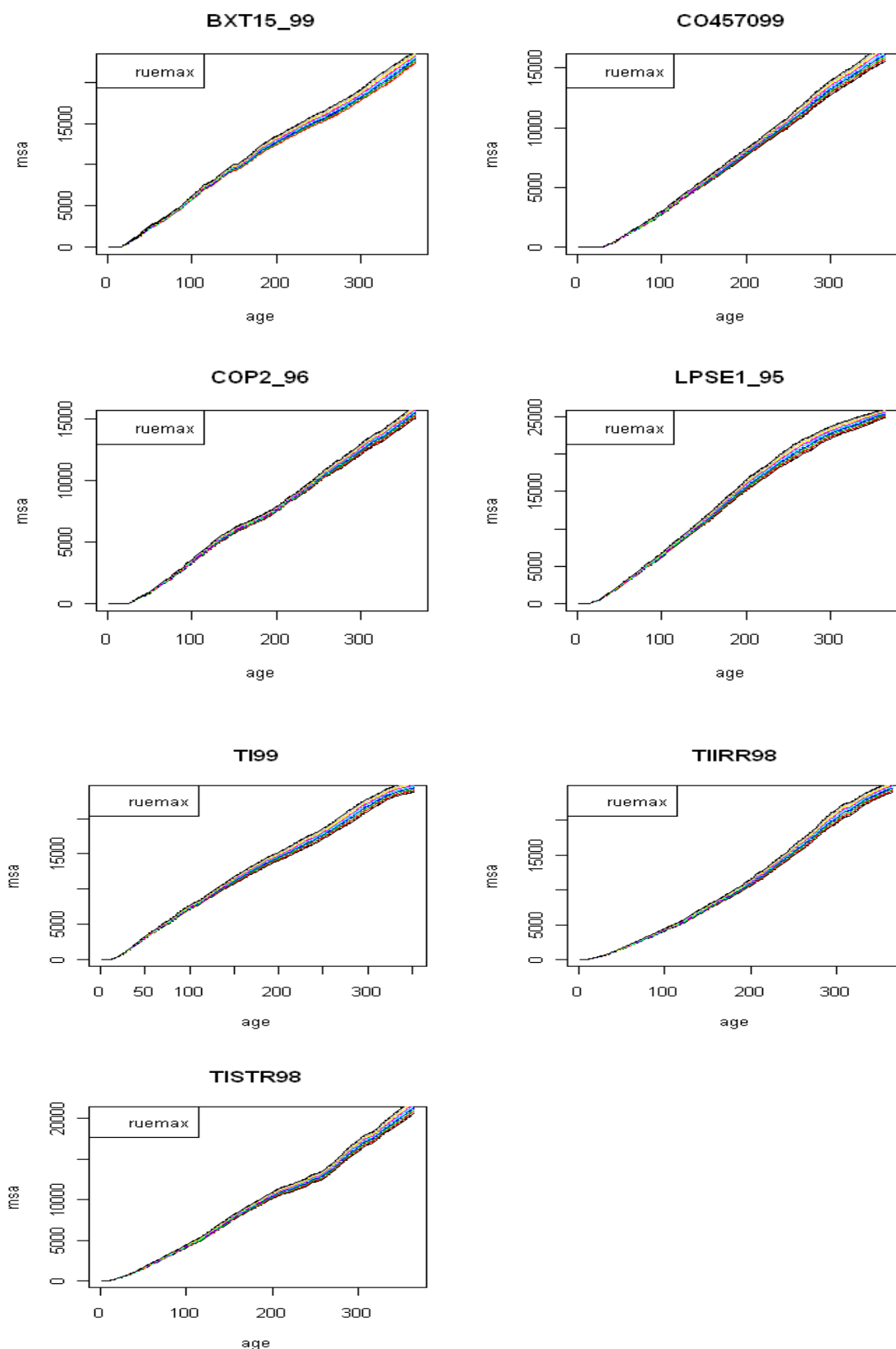


Figure F.2.3.c1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *ruemax*

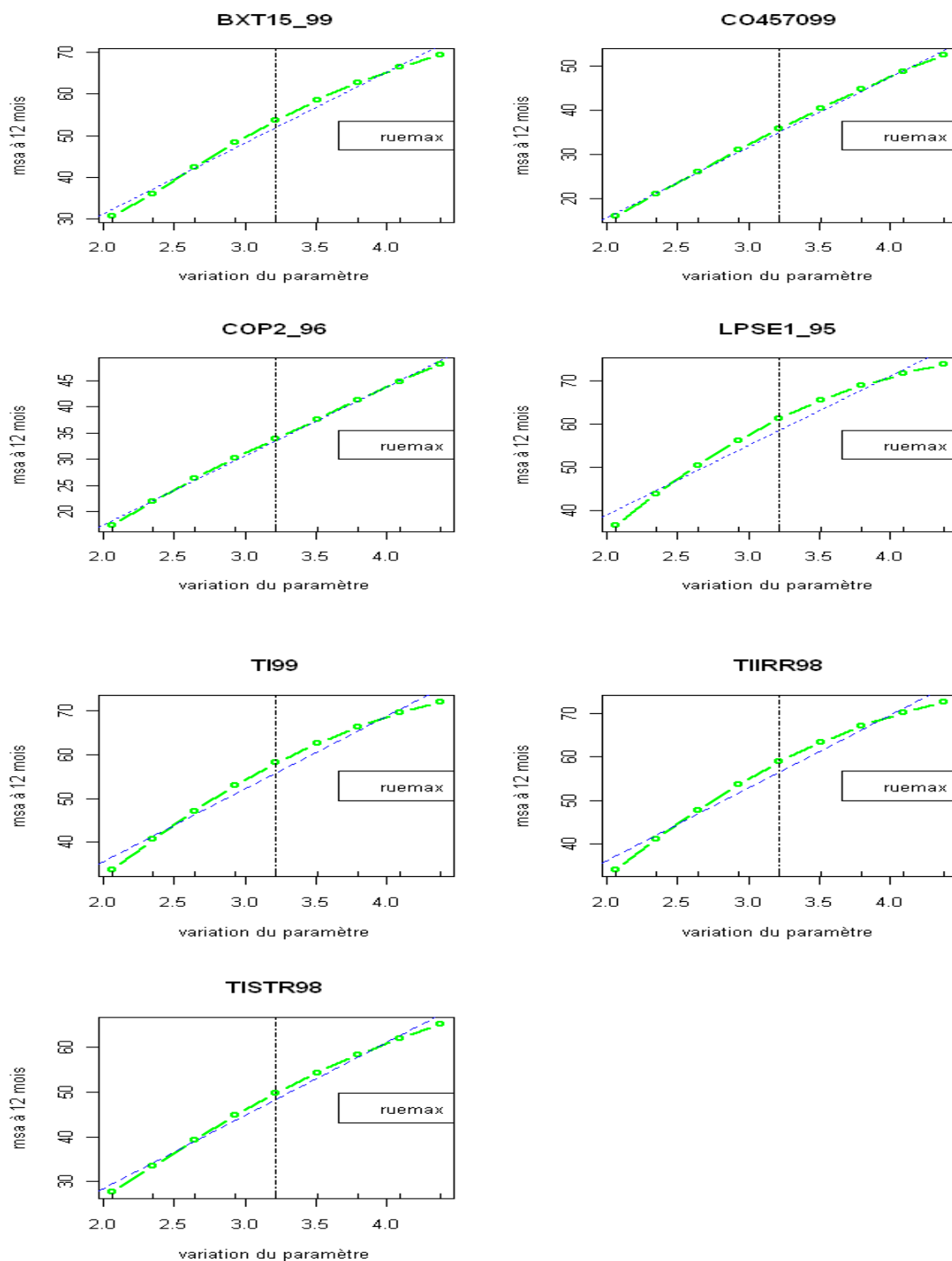


Figure F.2.3.c2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *ruemax*

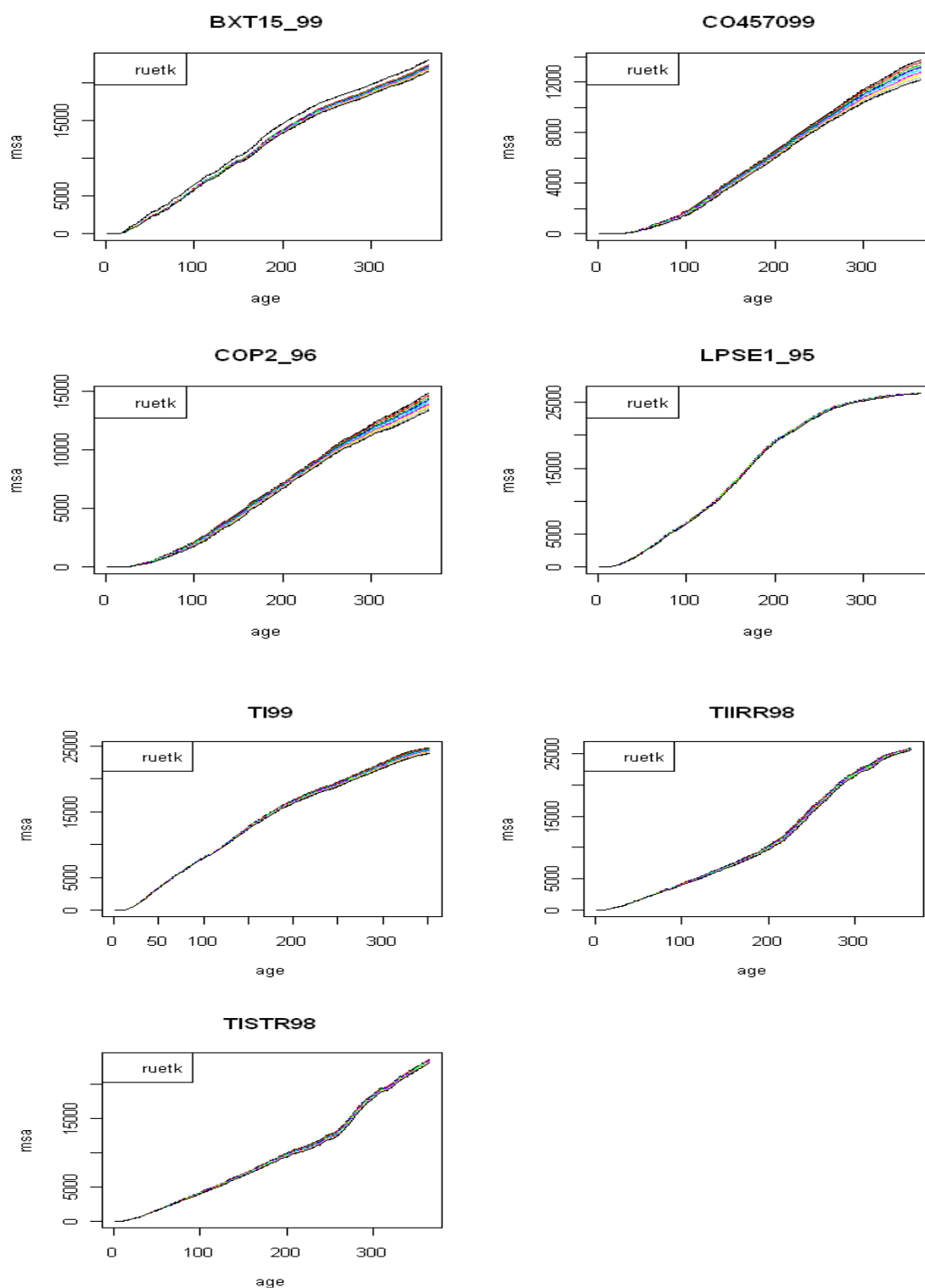


Figure F.2.4.d1 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *ruetk*

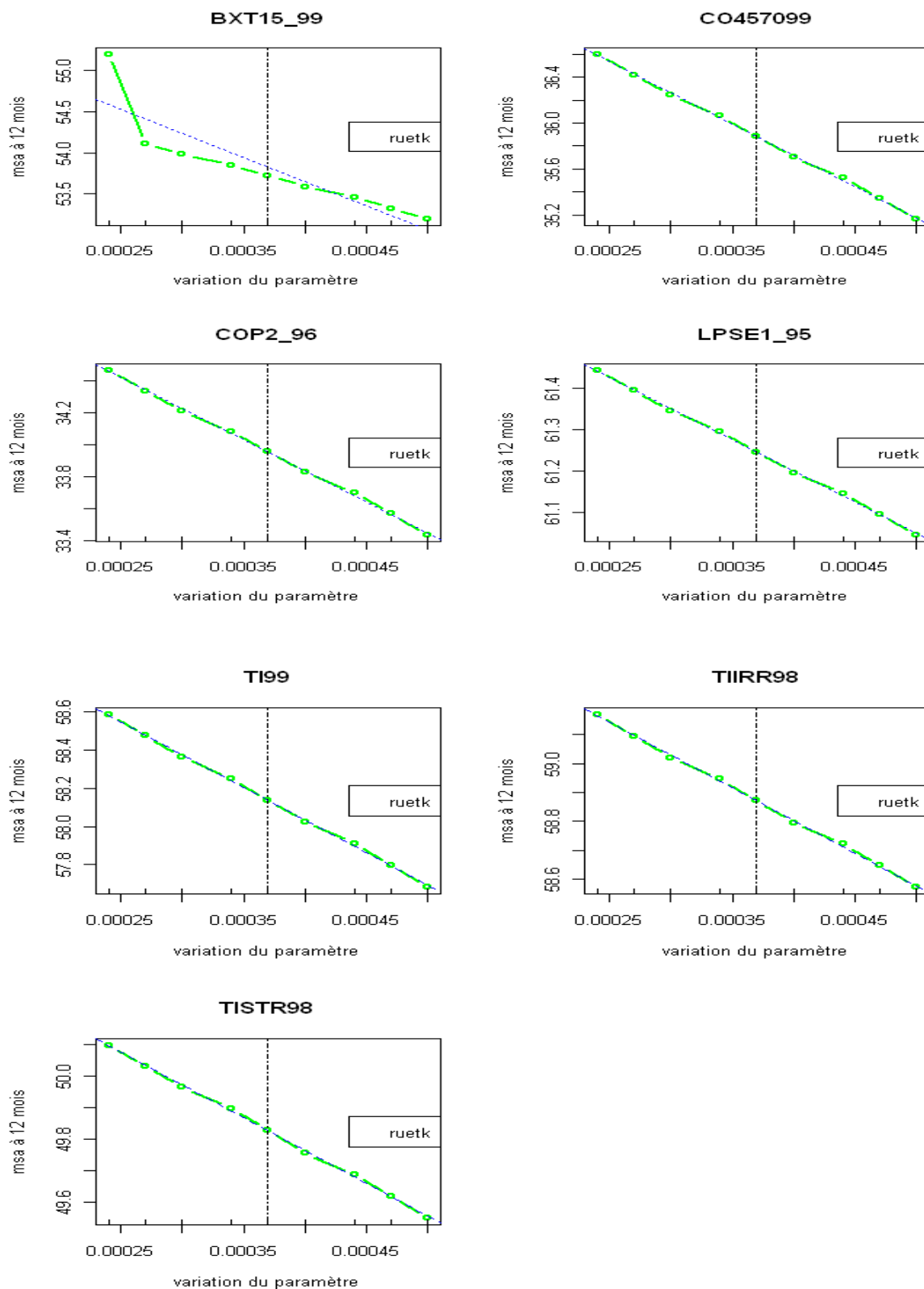


Figure F.2.4.d2 – L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *ruetk*

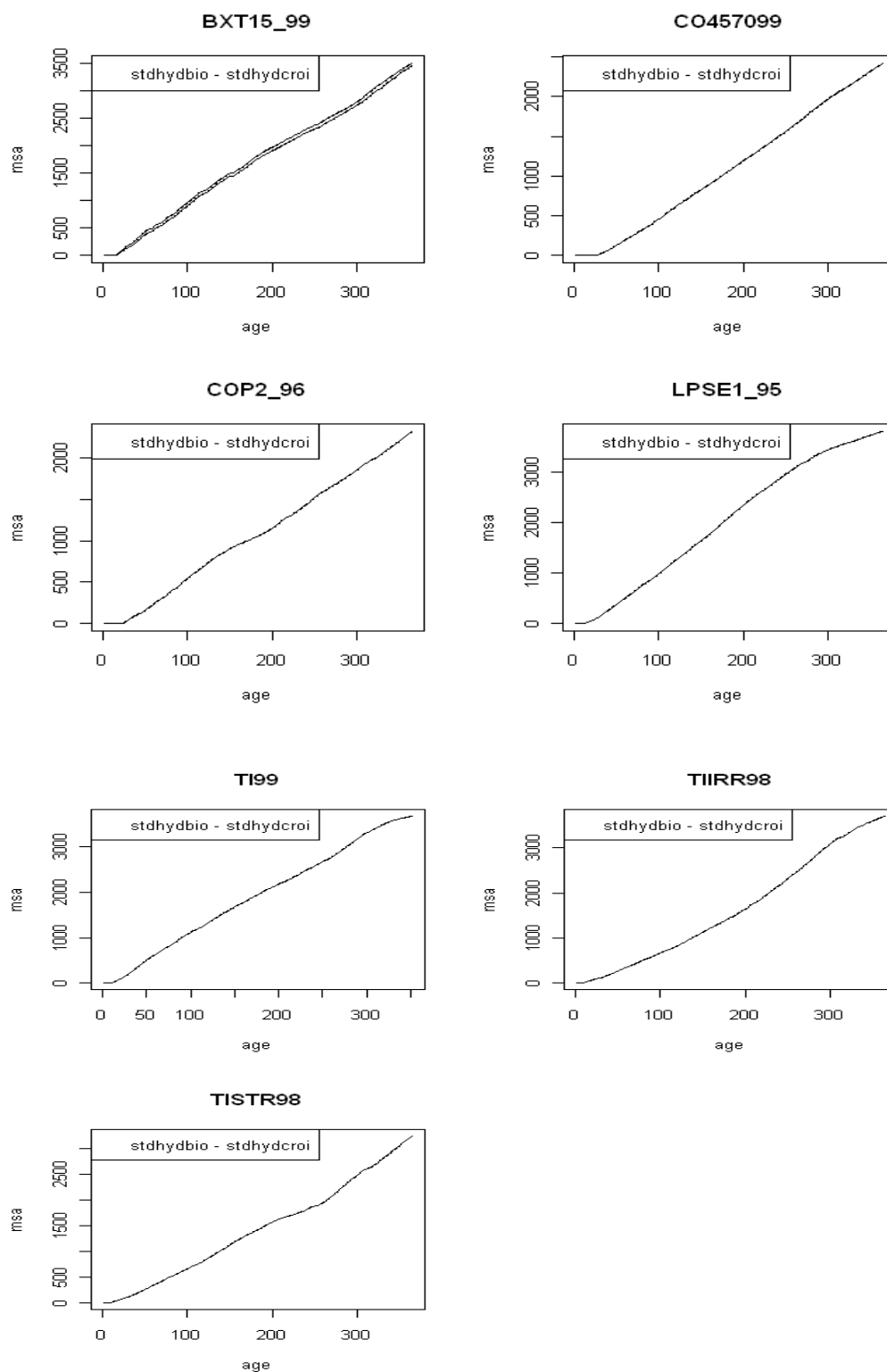


Figure F.2.5.e1 L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite durant le cycle de culture de la canne sous l'effet de la variation de *sthydbio* / *sthydcroi*

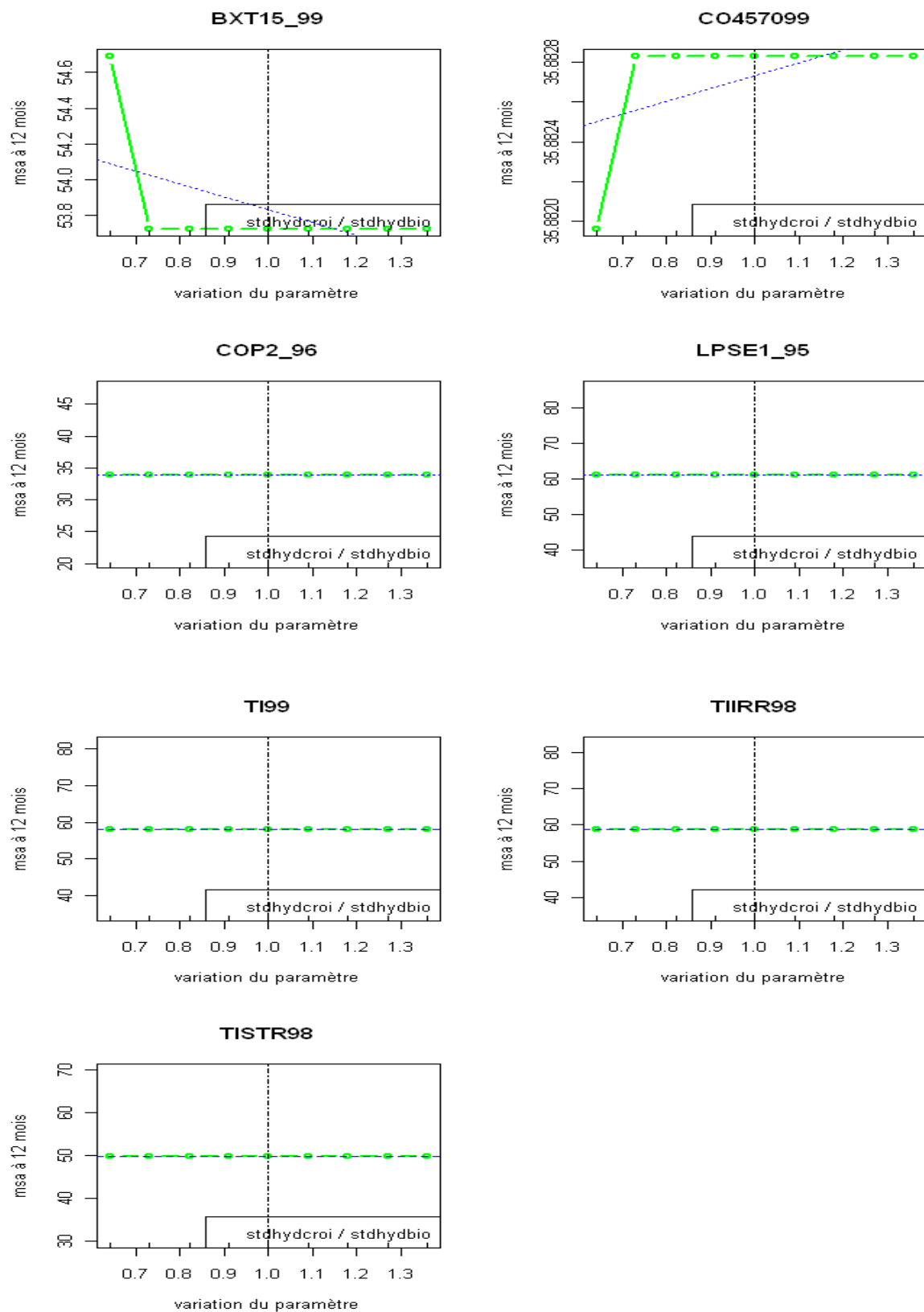


Figure F.2.5.e2 L'évolution de la variabilité de la matière sèche aérienne produite à 12 mois sous l'effet de la variation de *sthydbio* / *sthydcroi*

F.3. Annexe 3 : Présentation de Probe et des données associées

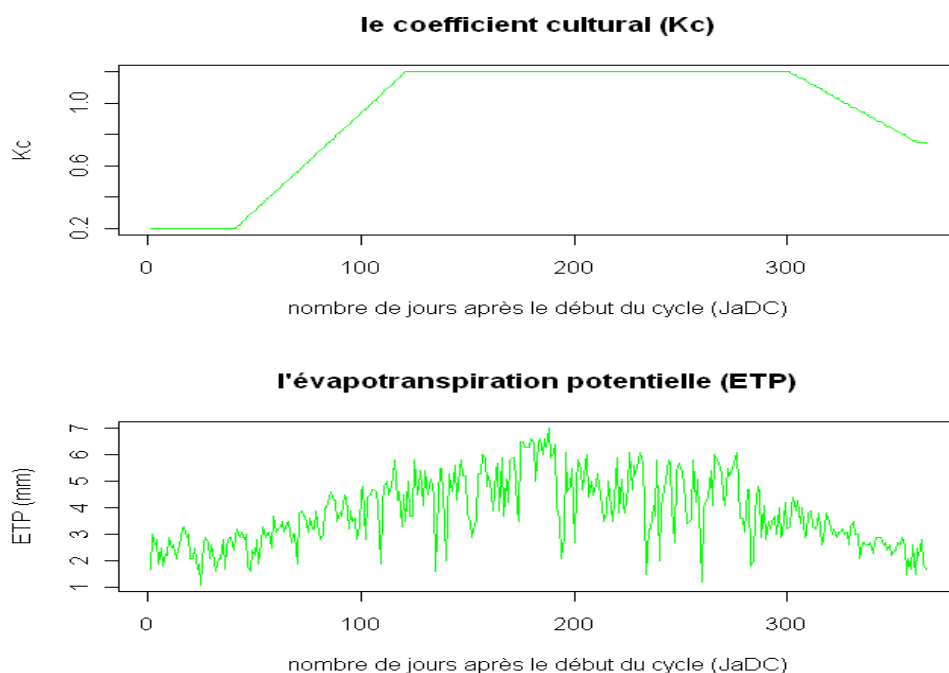


Figure F.3.1 – Courbes d'évolutions journalières du coefficient cultural et de l'évapotranspiration potentielle de la canne.

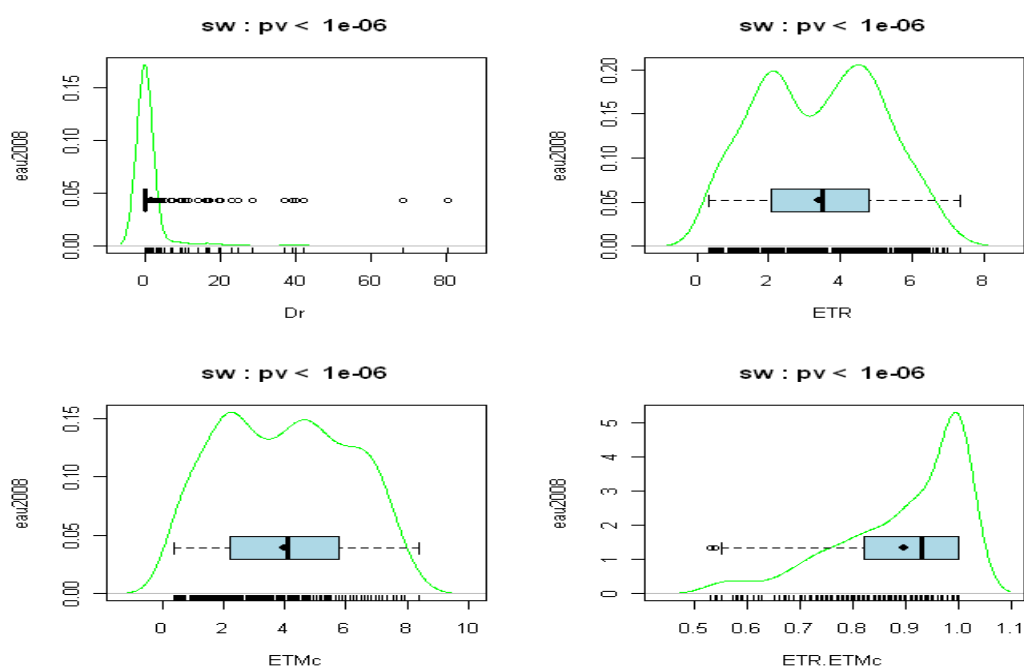


Figure F.3.2 – Densité et boîte à moustaches associées à chaque variable du bilan hydrique

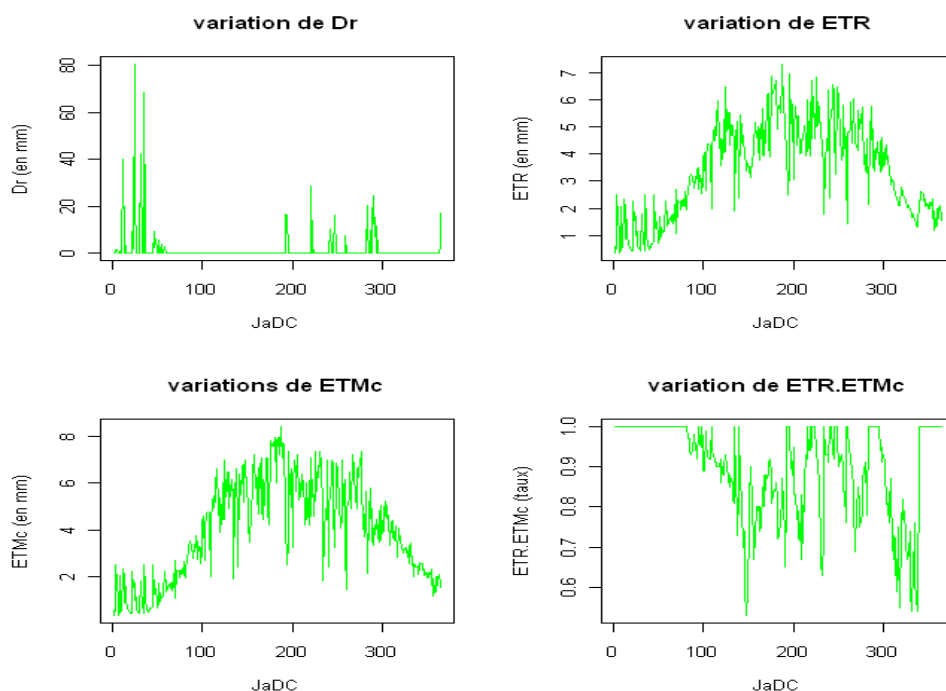


Figure F.3.3 – Courbes d’évolution des variables du bilan hydrique en fonction du nombre de jours après le début du cycle.

F.4. Annexe 4 : Analyse de sensibilité des variables d’entrée de Probe

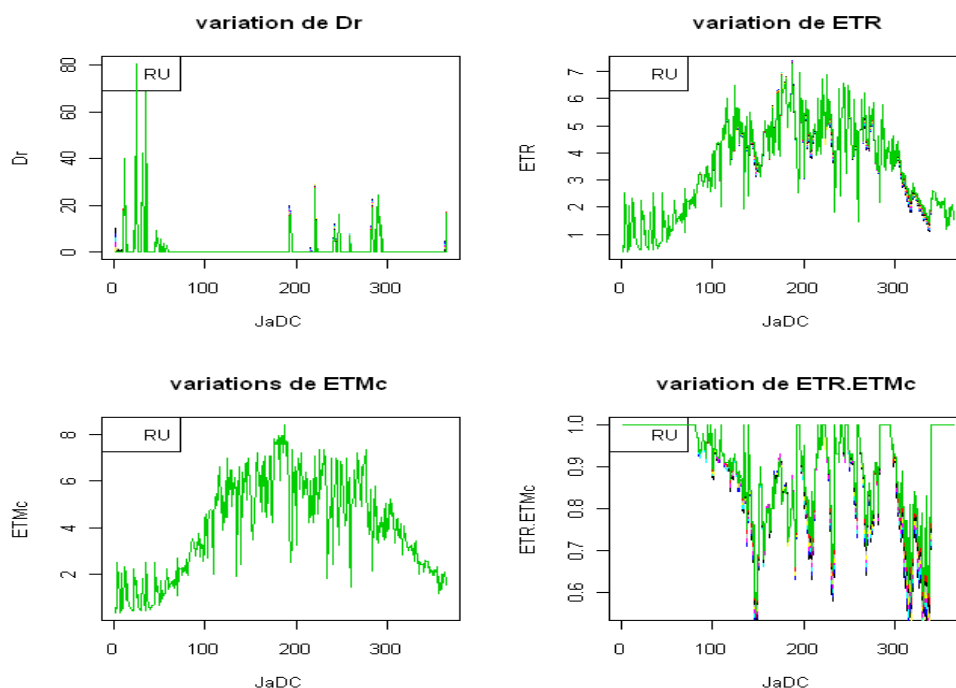


Figure F.4.1 – Courbes d’évolution des termes du bilan sous l’effet de la variation de la réserve utile

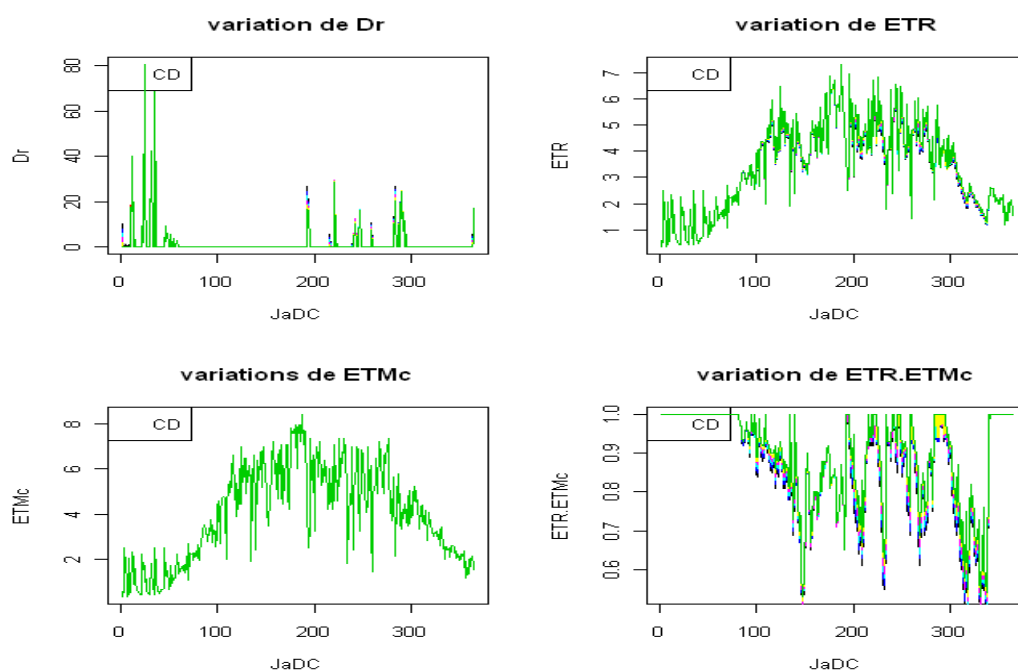


Figure F.4.2 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de la cote de drainage

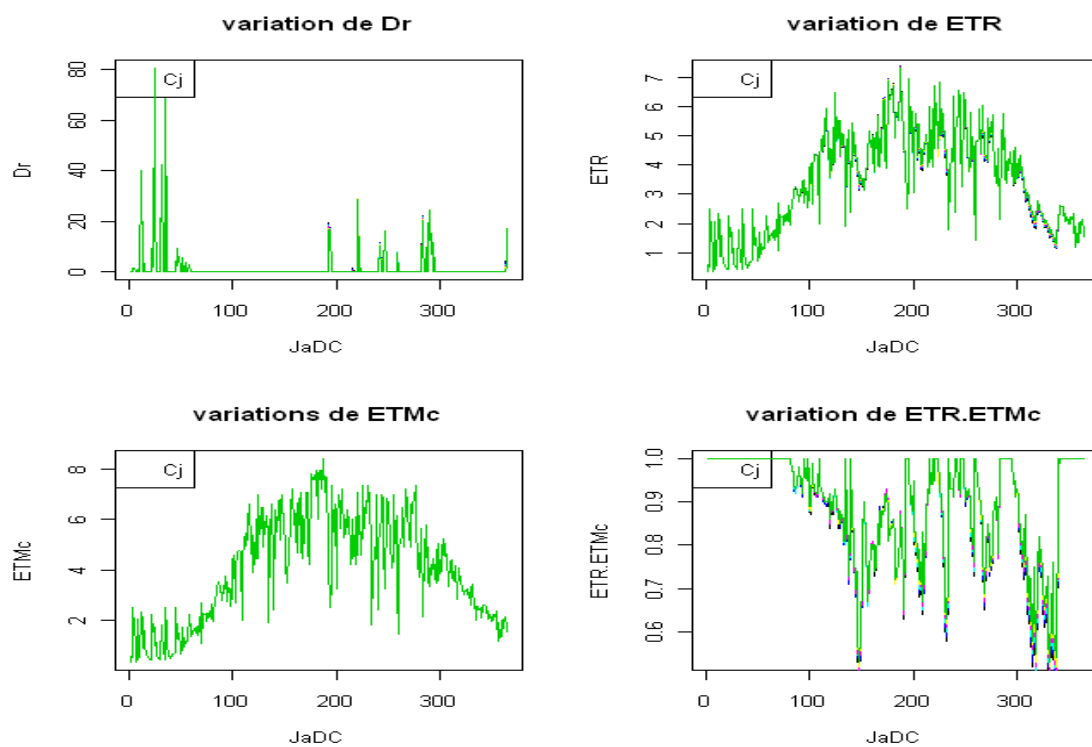


Figure F.4.3 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de la vitesse de croissance racinaire

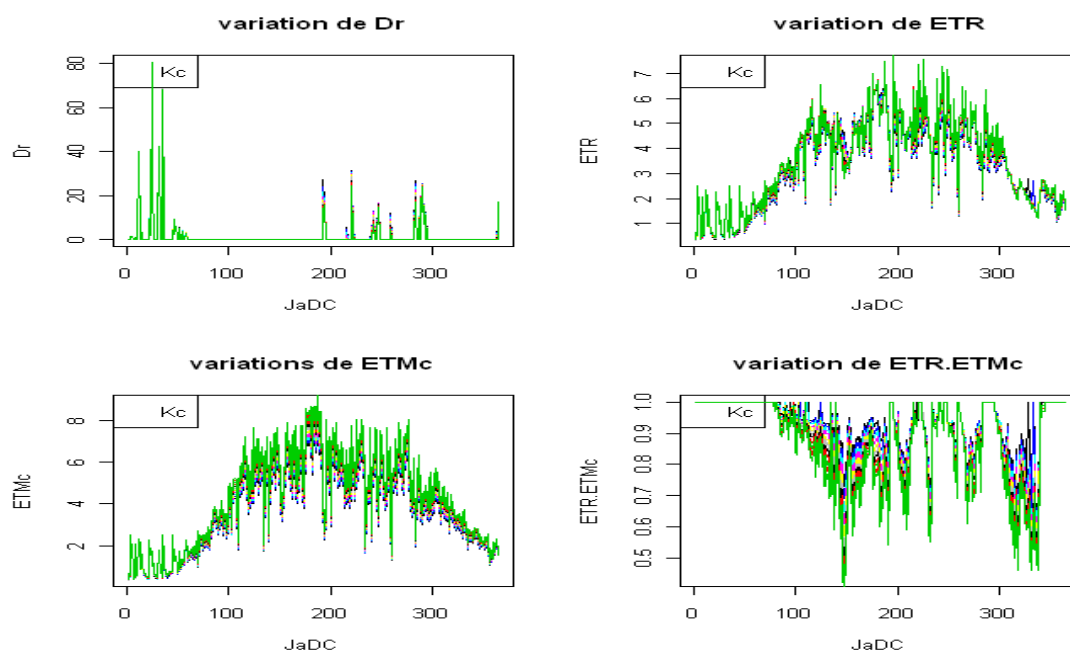


Figure F.4.4 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation du coefficient cultural

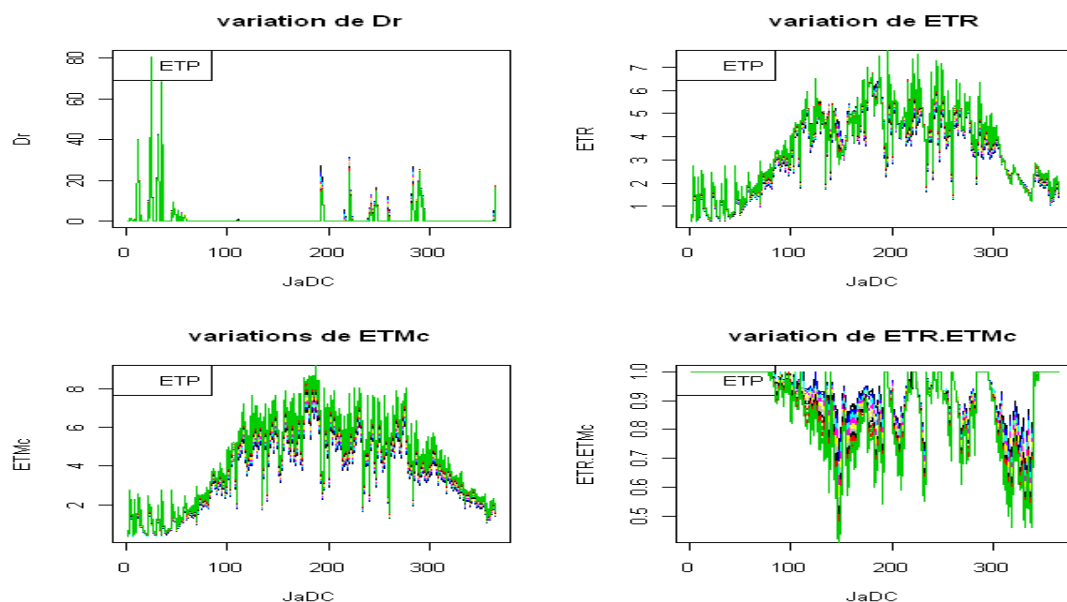


Figure F.4.5 – Courbes d'évolution des termes du bilan sous l'effet de la variation de l'évapotranspiration potentielle

F.5. Annexe 5 : Les indices de sensibilités des variables d’entrées de Mosaic

Tableau F.5.1 – Les paramètres plantes relatifs à l’action de l’indice foliaire

<i>code_param</i>	<i>définitions</i>	<i>val_plante</i>	<i>val_repousse</i>
<i>laicroi</i>	la vitesse de croissance du lai	0.00378	0.035
<i>laitb</i>	la température seuil d’élongation de croissance du lai	12	12.6
<i>laideb</i>	le stade d’apparition du lai	500	100
<i>laidebsen</i>	le stade début de sénescence des feuilles	3.5	3.5
<i>laitksen</i>	l’effet de la température sur la sénescence des limbes	1.4	1.4
<i>laiwksen</i>	l’effet du stress hydrique sur la sénescence des limbes	0.03	0.029

Tableau F.5.2 – La sensibilité du modèle suite aux variations des paramètres relatifs à l’action de l’indice foliaire sur la biomasse aérienne

<i>cod_param</i>	<i>unité</i>	<i>val_std</i>	<i>variation (%)</i>	<i>nbre_iteration</i>	<i>plage_variation</i>
<i>laicroi</i>	/°C	0.035	9	4	0.022 – 0.048
<i>laitb</i>	/°C	12.6	9	4	7.68 – 16.32
<i>laideb</i>	s.u	100	9	4	64 – 136
<i>laidebsen</i>	s.u	3.5	9	4	2.24 – 4.76
<i>laitksen</i>	/°C	1.4	9	4	0.896 – 1.904
<i>laiwksen</i>	s.u	0.029	9	4	0.019 – 0.039

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>écarts</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
<i>BXT15_99</i>	<i>laicroi</i>	53.83	0.33	10.776	0,30	-0.718
<i>C0457099</i>	<i>laicroi</i>	35.89	s.n ²⁷			
<i>COP2_96</i>	<i>laicroi</i>	33.95	0.017	-0.938	0,80	0.063
<i>LPSE1_95</i>	<i>laicroi</i>	61.24	s.n			
<i>TI99</i>	<i>laicroi</i>	58.14	s.n			

²⁷ s.n : sensibilité nulle car $\sigma(Y) \approx 0$ par conséquent *biais* ≈ 0

TIIRR98	<i>laicroi</i>	58.87	s.n
TISTR98	<i>laicroi</i>	49.83	s.n

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>écarts</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
BXT15_99	<i>laitb</i>	53.52	1.03	-34.107	0.84	-3.83
CO457099	<i>laitb</i>	33.89	4.95	-215.358	0.69	-16.719
COP2_96	<i>laitb</i>	32.47	3.37	-155.231	0.52	-9.866
LPSE1_95	<i>laitb</i>	61.42	0.16	-10.909	0,07	-0.163
TI99	<i>laitb</i>	58.11	0.18	-4.611	0.75	0.631
TIIRR98	<i>laitb</i>	58.77	0.12	-2.233	0,35	0.285
TISTR98	<i>laitb</i>	49.73	0.13	-6.104	0,29	-0.282

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>écarts</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
BXT15_99	<i>laideb</i>	53.85	0.82	13.025	0.915	-3.189
CO457099	<i>laideb</i>	35.83	0.64	-4.823	0.984	-2.584
COP2_96	<i>laideb</i>	33.93	0.34	-2.34	0.983	-1.378
LPSE1_95	<i>laideb</i>	61.26	0.29	1.761	0.973	-1.169
TI99	<i>laideb</i>	58.24	0.31	10.524	0.952	-1.241
TIIRR98	<i>laideb</i>	58.86	0.26	-0.249	0.979	-1.046
TISTR98	<i>laideb</i>	49.79	0.14	-3.921	0.958	-0.532

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>écarts</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
BXT15_99	<i>laidebsen</i>	53.74	0.35	1.928	0.624	1.126
CO457099	<i>laidebsen</i>	35.82	0.28	-6.205	0.959	1.136
COP2_96	<i>laidebsen</i>	33.89	0.34	-6.972	0.961	1.362
LPSE1_95	<i>laidebsen</i>	61.10	0.72	-14.236	0.96	2.864

TI99	<i>laidebsen</i>	58.06	0.45	-7.823	0.975	1.809
TIIRR98	<i>laidebsen</i>	58.77	0.56	-10.075	0.966	2.141
TISTR98	<i>laidebsen</i>	49.66	0.62	-16.481	0.935	2.415

parcelles	paramètres θ	$E(Y)$	$\sigma(Y)$	écarts	indices	pentés
BXT15_99	<i>laitksen</i>	53.83	0.52	10.863	0.72	-1.775
C0457099	<i>laitksen</i>	35.88	0.13	-0.125	0.999	-0.52
COP2_96	<i>laitksen</i>	33.96	0.14	0.05	0.999	-0.565
LPSE1_95	<i>laitksen</i>	61.26	0.44	1.447	0.999	-1.8
TI99	<i>laitksen</i>	58.14	0.32	-0.053	0.999	-1.311
TIIRR98	<i>laitksen</i>	58.87	0.37	0.174	0.999	-1.503
TISTR98	<i>laitksen</i>	49.84	0.13	0.389	0.997	-0.522

parcelles	paramètres θ	$E(Y)$	$\sigma(Y)$	écarts	indices	pentés
BXT15_99	<i>laiwksen</i>	53.82	0.42	10.246	0.405	-1.312
C0457099	<i>laiwksen</i>	35.88	0.12	-0.043	0.998	-0.048
COP2_96	<i>laiwksen</i>	33.95	0.20	-0.675	0.996	-0.816
LPSE1_95	<i>laiwksen</i>	61.24	0.71	-0.59	0.994	-0.286
TI99	<i>laiwksen</i>	58.13	0.17	-0.699	0.999	-0.679
TIIRR98	<i>laiwksen</i>	58.86	0.11	-0.837	0.996	-0.458
TISTR98	<i>laiwksen</i>	49.79	1.29	-3.512	0.998	-5.195

Tableau F.5.3 – Les paramètres plantes relatifs à la conversion en biomasse

<i>code_param</i>	<i>définitions</i>	<i>val_plante</i>	<i>val_repousse</i>
<i>ruemax</i>	le coefficient maximum de conversion du rayonnement en biomasse	5.85	3.22
<i>ruetk</i>	l'effet de la température sur la conversion	0.00586	0.00037
<i>rueopt</i>	la température optimale de conversion	29.5	30.4

<i>cod_param</i>	<i>unité</i>	<i>val_std</i>	<i>variation (%)</i>	<i>nbre_iteration</i>	<i>plage_variation</i>
<i>ruemax</i>	<i>g/MJ</i>	3.22	9	4	2.061 – 4.379
<i>ruetk</i>	<i>s.u</i>	0.00037	9	4	0.00024 – 0.00050
<i>rueopt</i>	<i>°C</i>	30.4	9	4	19.456 – 41.344

Tableau F.5.4 – La sensibilité du modèle suite aux variations des paramètres relatifs à la conversion du rayonnement utile intercepté en biomasse aérienne

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>biais</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
<i>BXT15_99</i>	<i>ruemax</i>	52.02	13.65	-170.895	0.988	55.041
<i>C0457099</i>	<i>ruemax</i>	35.15	12.66	-73.332	0.997	51.288
<i>COP2_96</i>	<i>ruemax</i>	33.52	10.49	-43.481	0.998	42.55
<i>LPSE1_95</i>	<i>ruemax</i>	58.65	12.92	-259.049	0.967	51.567
<i>TI99</i>	<i>ruemax</i>	55.89	13.34	-224.433	0.977	53.489
<i>TIIRR98</i>	<i>ruemax</i>	56.49	13.45	-237.744	0.974	53.857
<i>TISTR98</i>	<i>ruemax</i>	48.29	13.01	-153.881	0.99	52.5

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>biais</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
<i>BXT15_99</i>	<i>ruetk</i>	53.83	0.59	10.487	0.793	-2.176
<i>C0457099</i>	<i>ruetk</i>	35.88	0.49	-0.094	0.999	-2.014
<i>COP2_96</i>	<i>ruetk</i>	33.95	0.35	-0.241	0.999	-1.442
<i>LPSE1_95</i>	<i>ruetk</i>	61.25	0.13	-0.079	0.999	-0.555

TI99	<i>ruetk</i>	58.14	0.31	-0.17	0.999	-1.267
TIIRR98	<i>ruetk</i>	58.87	0.20	-0.07	0.999	-0.837
TISTR98	<i>ruetk</i>	49.82	0.19	-0.406	0.999	-0.768

<i>parcelles</i>	<i>paramètres θ</i>	<i>E(Y)</i>	<i>$\sigma(Y)$</i>	<i>biais</i>	<i>indices</i>	<i>pentés</i>
BXT15_99	<i>rueopt</i>	53.96	0.33	10.776	0.3	-0.718
C0457099	<i>rueopt</i>	35.89	s.n			
COP2_96	<i>rueopt</i>	33.96	s.n			
LPSE1_95	<i>rueopt</i>	61.25	s.n			
TI99	<i>rueopt</i>	58.14	s.n			
TIIRR98	<i>rueopt</i>	58.87	s.n			
TISTR98	<i>rueopt</i>	49.83	s.n			

F.6. Annexe 6 : Méthodes statistiques et démonstrations

Standardized Regression Coefficients (SRC)

$$y_j = b_0 + b_1\theta + \varepsilon_j \text{ pour tout } j = 1, \dots, p$$

Où

- θ est le vecteur correspondant aux différentes valeurs prises par le paramètre considéré.
- b_1 est le paramètre du modèle lié à la valeur en cours de θ
- b_0 est le terme constant du modèle ou la quantité de *msa* qu'on obtient au début du cycle.
- $\varepsilon_j \sim (0, \sigma^2)$
- y_j est la *msa* produite à 12 mois en fonction de θ .

On a :

$$\bar{y} = \sum_j \frac{y_j}{p} = \sum_j \frac{1}{p} * (b_0 + \sum_{j=1}^n b_1\theta_j + \varepsilon_j)$$

$$\bar{y} = \hat{b}_0 + \sum_j \frac{1}{p} * (\sum_{j=1}^p b_1\theta_j) + \bar{\varepsilon} = \hat{b}_0 + \sum_{j=1}^p 1 \sum_j \frac{1}{p} * \theta_j$$

Avec $\bar{\varepsilon} = 0$ car $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma^2)$

$$\bar{y} = \hat{b}_0 + \sum_{j=1}^p \hat{b}_1 \bar{\theta}_j$$

Donc

$$y - \bar{y} = \sum_{j=1}^p \hat{b}_1 (\theta_j - \bar{\theta}_j)$$

D'où

$$\frac{y - \bar{y}}{\hat{s}} = \sum_j \frac{\hat{b}_1 \hat{s}_j}{\hat{s}} \frac{\theta_j - \bar{\theta}_j}{\hat{s}_j}$$

Avec

$$\bar{y} = \sum_j \frac{y_j}{p} ; \bar{\theta}_j = \sum_j \frac{\theta_j}{p} ; \hat{s}_y = \left[\sum_j \frac{(y_j - \bar{y})^2}{p-1} \right]^{1/2} ; \hat{s}_\theta = \left[\sum_j \frac{(\theta_j - \bar{\theta}_j)^2}{p-1} \right]^{1/2}$$

Alors

$$SRC_\theta = \frac{\hat{b}_1 \hat{s}_\theta}{\hat{s}_y}$$

Relation entre le coefficient SRC et le coefficient de détermination linéaire

On a :

$$\rho_{\{\theta, y\}} = \frac{cov(\theta, y)}{\sqrt{v(\theta)v(y)}}$$

$$cov(\theta, y) = \frac{1}{p} \sum_j (\theta_j - \bar{\theta}_j)(y_j - \bar{y}_j) = \frac{1}{p} \sum_j (\theta_j - \bar{\theta}_j)(\hat{b}_1 \theta_j - \hat{b}_1 \bar{\theta}_j)$$

$$cov(\theta, y) = \hat{b}_1 \frac{1}{p} \sum_j (\theta_j - \bar{\theta}_j)^2 = \hat{b}_1 v(\theta)$$

Donc

$$\rho_{\{\theta, y\}} = \frac{\hat{b}_1 v(\theta)}{\sqrt{v(\theta)v(y)}} = \hat{b}_j * \frac{\sqrt{v(\theta)}}{\sqrt{v(y)}}$$

D'où

$$\rho_{\{\theta, y\}}^2 = SRC_\theta$$

Table ANOVA pour la régression

<i>Source</i>	<i>DF(degrees of freedom)</i>	<i>SS(Sum of Squares)</i>	<i>MS(Mean of Squares)</i>	<i>F</i>
<i>Regression</i> <i>(or Model)</i>	$p - 1$	SSR	$MSR = \frac{SSR}{p - 1}$	$F = \frac{MSR}{MSE}$
<i>Errors</i>	$n - p$	SSE	$MSE = \frac{SSE}{n - p}$	
<i>Total</i>	$n - 1$	TSS		

Source de variation : Régression - ***Indice de sensibilité*** = $\frac{SSR}{TSS}$